

TUGAS AKHIR - TE091399

**EVALUASI PENGARUH LOKASI PEMASANGAN SURJA
ARRESTER PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI
(SUTT) 150 KV TERHADAP TEGANGAN LEBIH
*SWITCHING***

Mila Hikmatul Ulawia
NRP 2212105028

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

FINAL ASSIGNMENT - TE 091399

**EVALUATION OF INSTALLATION LOCATION EFFECT OF
SURGE ARRESTER ON 150 KV HIGH-VOLTAGE
OVERHEAD LINE (SUTT) FOR SWITCHING
OVERVOLTAGE**

Mila Hikmatul Ulawia
NRP 2212 105 028

Advisors

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**EVALUASI PENGARUH LOKASI PEMASANGAN
SURJA ARRESTER PADA SALURAN UDARA
TEGANGAN TINGGI (SUTT) 150 KV TERHADAP
TEGANGAN LEBIH SWITCHING**

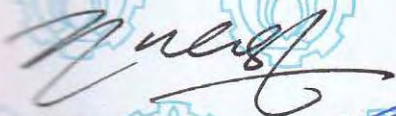
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dosen Pembimbing II



Made Yulistya N ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

IGN Satriyadi Hernanda, ST, MT
NIP. 197301232002121001



**SURABAYA
JANUARI, 2015**

Evaluasi Pengaruh Lokasi Pemasangan Surja Arrester pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 KV terhadap Tegangan Lebih *Switching*

Nama : Mila Hikmatul Ulawia
NRP : 2212105058
Pembimbing : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST,M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda,ST,MT.

ABSTRAK

Tegangan lebih transien adalah tegangan yang mempunyai amplitudo sangat besar dan berlangsung sangat singkat yang disebabkan karena operasi pensaklaran (peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga). Tegangan lebih transien yang disebabkan oleh operasi pensaklaran disebut surja hubung. Pada operasi pensaklaran akan menghasilkan gejala surja hubung atau transien energi listrik, yang berupa tegangan lebih transien berupa gelombang impuls yang mempunyai muka gelombang dan ekor gelombang. Untuk mengurangi tegangan lebih surja hubung dibutuhkan suatu letak pemasangan surja arrester yang optimal di saluran transmisi. Arrester adalah peralatan yang digunakan untuk mencegah terjadinya kerusakan akibat adanya tegangan transien yang berlebih. Pada evaluasi ini akan dibuat pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ATP/EMTP untuk menganalisis pengaruh lokasi pemasangan surja arrester terhadap tegangan lebih *switching* pada saluran udara 150 kV dengan pemasangan arrester pada menara-menara di awal, tengah dan ujung saluran. Diambil contoh saluran transmisi dari Waru ke Karangpilang yang terdiri dari 28 menara dengan pemasangan arrester pada ujung saluran (menara ke-28) adalah 124.47 kV saat tidak berbeban, 124.52kV saat berbeban resistif 50 ohm dan 124.61 kV saat berbeban resistif 101.35 ohm sehingga pemasangan satu arrester sudah efektif memotong tegangan lebih.

Kata kunci: Saluran Transmisi, Tegangan Lebih *Switching*, Transien, ATP/EMTP, Surja Arrester

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

Evaluation of Installation Location Effect of Surge Arrester on 150 KV High-Voltage Overhead Line (SUTT) for Overvoltage Switching

Name : Mila Hikmatul Ulawia
NRP : 2212105058
Advisor : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara,ST,M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda,ST,MT.

ABSTRACT

Transient voltage is the voltage amplitude is very large and has a very short due to the switching operation (opening and closing events of the circuit breaker). Transient overvoltage caused by the switching operation is called surge circuit. In the switching operation will generate symptoms circuited surge or transient electrical energy, in the form of overvoltage transients in the form of an impulse wave that has the face of a wave and wave tail. To reduce the surge overvoltage circuit needed a location of installation of surge arresters at the optimal transmission line. Arresters are devices used to prevent damage due to excessive voltage transients. In this evaluation will be made of modeling and simulation software using ATP / EMTP to analyze the influence of the installation location of the voltage surge arrester is switching on the air duct 150 kV with installation of arresters on towers at the beginning , middle and end of the channel. Taken sample transmission line from Waru to Karangpilang which consists of 28 towers with the installation of arresters at the end of the line (the tower to-28) is 124.47 kV when not loaded, 124.52 kV currently 50 ohm resistive burden and current 124.61 kV resistive 101.35 ohm burden so that the installation of the arresters has been effectively cut off overvoltage.

Keywords : Transmission Lines, *Switching Overvoltage*, Transient, ATP/EMTP, Surge Arrester

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang tak terhingga berupa kesabaran, ketegaran, dan kekuatan untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Penulisan tugas akhir ini salah satunya bertujuan untuk memenuhi syarat untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Kepada orang tua tercinta yang tak putusnya memberikan semangat, mendoakan serta memberikan dukungan untuk keberhasilan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc dan Bapak IGN Satriyadi Hernanda, ST,MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya dan memberikan banyak ilmu kepada saya.
3. Bapak Rudi dan Bapak Muhaji yang memberikan data dan ilmunya dalam menunjang tugas akhir ini maupun juga di lapangan.
4. Seluruh rekan Lintas Jalur-2012 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 2 tahun ini. Terima kasih.
5. Kakak saya dan mas lisnorivo yang selalu mendoakan, menasehati dan mendukung secara moral dan spiritual.
6. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen maupun dosen penguji, karyawan, mahasiswa, dan teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Perumusan Masalah.....	2
1.3	Batasan Masalah.....	2
1.4	Tujuan	2
1.5	Sistematika Penulisan.....	2

BAB 2 TEGANGAN LEBIH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1	Klasifikasi Tegangan Tinggi	5
2.1.2	Tegangan Tinggi.....	6
2.2	Saluran Transmisi.....	6
2.3	Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT).....	8
2.4	Sistem Tegangan Lebih	13
2.5	Surja Hubung.....	16
2.6	Transien.....	19
2.6.1	Transien Pada Rangkaian R-L.....	20
2.6.2	Transien Pada Rangkaian R-C.....	21
2.6.3	Transien Pada Rangkaian R-L-C.....	22
2.7	Analisis Transien.....	22
2.7.1	Analisis Transien – Gelombang Berjalan	23
2.7.2	Analisis Transien – Gelombang Pantul	27
2.8	Parameter Saluran	29

2.9	Surja Arrester	34
2.9.1	Arrester Ekspulsi atau Tabung Pelindung	37
2.9.2	Arrester Katup	38
2.9.3	Karakteristik Arrester	41
2.10	Pertimbangan Pemilihan Arrester	43
2.11	Tegangan Sistem	44
2.11.1	Sistem yang Tidak Diketanahkan atau Sistem Terisolasi	44
2.11.2	Sistem Diketanahkan dengan Kumpanan Petersen.	44
2.11.3	Sistem Diketanahkan dengan Impedansi	44
2.12	Rating Arrester	45

BAB 3 PEMODELAN SALURAN TRANSMISI 150 KV

3.1	Permodelan Menggunakan ATP / EMTP	47
3.2	Model Saluran Transmisi 150 kV	48
3.3	Koordinasi Lokasi Penempatan Arrester dengan Isolasi Peralatan Yang Dilindungi	51
3.4	Pemilihan dan Lokasi Penempatan Arrester ^[2]	52
3.5	Jarak Lindung Penangkap Petir	56
3.6	Permodelan Tegangan Lebih <i>Switching</i>	57

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	Perhitungan Parameter Saluran Transmisi	61
4.2	Pemodelan dan Analisa Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi 150 kV	62
4.2.1	Permodelan ATP / EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban	63
4.2.2	Permodelan ATP / EMTP Saluran Transmisi Berbeban. .	67
4.3	Analisa Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban dan Berbeban	74
4.3.1	Analisa Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban	74
4.3.2	Analisa Transien Gelombang Berjalan.	78

4.3.3	Analisa Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi Berbeban	79
4.4	Permodelan dan Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi 150 kV Pada Pemasangan Arrester	82
4.4.1	Permodelan dan Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban dengan Pemasangan Arrester	83
4.4.2	Permodelan dan Hasil Simulasi ATP / EMTP Saluran Transmisi Berbeban dengan Pemasangan Arrester	89
4.5	Analisis Saluran Transmisi Tanpa Beban dan Berbeban Pada Pemasangan Arrester	100
4.5.1	Analisis Saluran Transmisi Tanpa Beban Pada Pemasangan Arrester.....	100
4.5.2	Analisis Saluran Transmisi Berbeban Pada Pemasangan Arrester.....	102

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran.....	108

DAFTAR PUSTAKA	107
-----------------------------	-----

LAMPIRAN	111
Lampiran A	111
Lampiran B	117
Lampiran C	126

BIODATA PENULIS	127
------------------------------	-----

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe menara 150 kV	9
Tabel 2.2 Pelepasan arus arrester ^[4]	43
Tabel 3.1 Data transmisi SUTT 150 KV	48
Tabel 3.2 Data spesifikasi menara transmisi 150 KV	49
Tabel 3.3 Data struktur menara transmisi 150 KV	50
Tabel A.1 Hasil pengukuran tahanan pentanahan menara SUTT 150kV <i>line</i> Waru-Karangpilang	112
Tabel A.2 Jumlah isolator yang diperlukan dan lebar sela tanduk guna pengaman terhadap surja hubung standart PLN.....	113
Tabel A.3 Jumlah isolator saluran yang diperlukan guna pengaman terhadap surja hubung (menurut Abdul Kadir, UI-press, 1998)	114
Tabel A.4 Tingkat isolasi dasar (BIL) untuk berbagai tegangan	115
Tabel A.5 Tingkat isolasi standar (SIL) untuk $52\text{kV} \leq U_m \leq 300\text{ Kv}$	116
Tabel B.1 Data permodelan LCC	117
Tabel B.2 Respon tegangan saluran transmisi tanpa beban dan berbeban	118
Tabel B.3 Respon waktu saluran transmisi tanpa beban dan berbeban	119
Tabel B.4 Respon waktu saluran transmisi tanpa beban dan berbeban terhadap pemasangan arrester.....	120
Tabel B.5 Respon tegangan saluran transmisi berbeban resistif 50ohm terhadap pemasangan arrester.....	121
Tabel B.6 Respon tegangan saluran transmisi berbeban resistif 101.35ohm terhadap pemasangan arrester.....	122
Tabel B.7 Respon waktu saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester.....	123
Tabel B.8 Respon waktu saluran transmisi berbeban resistif 50 ohm terhadap pemasangan arrester.....	124
Tabel B.9 Respon waktu saluran transmisi berbeban resistif 101.35ohm terhadap pemasangan arrester	125
Tabel C.1 Standart ACSR	126

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Menara jenis <i>lattice</i>	8
Gambar 2.2	Menara 4 sirkit tipe tension dan suspension	9
Gambar 2.3	Durasi dan besaran tegangan pada sistem tenaga listrik.....	14
Gambar 2.4	Standart tegangan impuls <i>switching</i>	18
Gambar 2.5	Bentuk tegangan impuls	19
Gambar 2.6	Rangkaian R-L seri	20
Gambar 2.7	Rangkaian R-C seri	21
Gambar 2.8	Model dari sebuah saluran transmisi	24
Gambar 2.9	Gelombang pantul dan maju dari suatu gelombang datang pada titik sambungan dari dua impedansi yang berbeda	27
Gambar 2.10	Penampang penghantar-penghantar yang sama pada suatu saluran tiga fasa.....	30
Gambar 2.11	Siklus transposisi	32
Gambar 2.12	Arrester jenis ekspulsi	38
Gambar 2.13	Arrester jenis katup	39
Gambar 2.14	Konstruksi dan bentuk fisis arrester MOV	40
Gambar 2.15	Kecuraman gelombang	42
Gambar 2.16	Pengaruh arrester terhadap surja	42
Gambar 3.1	Tampilan utama ATP <i>draw</i>	47
Gambar 3.2	Jangkauan arrester 80%	53
Gambar 3.3	Gelombang berjalan dan pantulannya	53
Gambar 3.4	Jarak arrester dan trafo	55
Gambar 3.5	Rangkaian <i>switching</i> dan respon gelombang impuls	58
Gambar 3.6	Parameter waktu RCI	58
Gambar 3.7	IEC 60060-1 standart arus impuls <i>exponential</i> dan <i>rectangular</i>	59
Gambar 4.1	Permodelan saluran transmisi tanpa beban	63
Gambar 4.2	Permodelan ATP / EMTP saluran transmisi tanpa beban.....	64
Gambar 4.3	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa Beban	66
Gambar 4.4	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban pada menara ke – 1	66

Gambar 4.5	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban pada menara ke – 14	67
Gambar 4.6	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa Beban pada menara ke – 28	68
Gambar 4.7	Pemodelan saluran transmisi berbeban	69
Gambar 4.8	Pemodelan saluran transmisi berbeban	70
Gambar 4.9	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban	70
Gambar 4.10	Hasil simulasi waktu puncak saluran transmisi berbeban	71
Gambar 4.11	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke – 1 dengan $R=50\text{ Ohm}$	71
Gambar 4.12	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke – 14 dengan $R=50\text{ Ohm}$	72
Gambar 4.13	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke – 28 dengan $R=50\text{ Ohm}$	72
Gambar 4.14	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-1 dengan $R=101.35\text{ Ohm}$	73
Gambar 4.15	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-14 dengan $R=101.35\text{ Ohm}$	73
Gambar 4.16	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-28 dengan $R=101.35\text{ Ohm}$	74
Gambar 4.17	Rangkaian sumber <i>switching</i>	74
Gambar 4.18	Tegangan puncak 3 fasa seimbang	75
Gambar 4.19	Diagram tegangan saluran transmisi tanpa beban	76
Gambar 4.20	Diagram waktu saluran transmisi tanpa beban	76
Gambar 4.21	Arus kapasitif (IC) pada saluran transmisi 150 kV	77
Gambar 4.22	Diagram <i>lattice</i>	78
Gambar 4.23	Diagram tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 50 ohm	80
Gambar 4.24	Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 50 ohm	81
Gambar 4.25	Diagram tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 101.35 ohm	81

Gambar 4.26	Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 101.35 ohm	81
Gambar 4.27	Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan pemasangan arrester	83
Gambar 4.28	Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-1	84
Gambar 4.29	Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-14	84
Gambar 4.30	Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-28	84
Gambar 4.31	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke – 1	85
Gambar 4.32	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke – 1 kondisi saluran transmisi tanpa beban	85
Gambar 4.33	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke – 1 kondisi saluran transmisi Tanpa beban	86
Gambar 4.34	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke – 14	86
Gambar 4.35	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke – 14 kondisi saluran transmisi tanpa beban	87
Gambar 4.36	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke – 14 kondisi saluran transmisi tanpa beban	87
Gambar 4.37	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke – 28	88
Gambar 4.38	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke – 28 kondisi saluran transmisi tanpa beban	88
Gambar 4.39	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke – 28 kondisi saluran transmisi tanpa beban	89

Gambar 4.40	Saluran transmisi dengan berbeban	89
Gambar 4.41	Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-1	90
Gambar 4.42	Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-14	90
Gambar 4.43	Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-28	91
Gambar 4.44	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50\text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-1	91
Gambar 4.45	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50\text{ ohm}$)	91
Gambar 4.46	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50\text{ ohm}$)	92
Gambar 4.47	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35\text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-1	92
Gambar 4.48	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35\text{ ohm}$)	93
Gambar 4.49	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35\text{ ohm}$)	94
Gambar 4.50	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50\text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-14	94
Gambar 4.51	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester Dipasang pada Menara ke-14 Kondisi saluran transmisi Berbeban ($R=50\text{ ohm}$)	94
Gambar 4.52	Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50\text{ ohm}$)	95
Gambar 4.53	Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35\text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-14	95

Gambar 4.54 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)	96
Gambar 4.55 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)	96
Gambar 4.56 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-28	97
Gambar 4.57 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$)	97
Gambar 4.58 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$)	98
Gambar 4.59 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-28.....	98
Gambar 4.60 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)	99
Gambar 4.61 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)	99
Gambar 4.62 Diagram tegangan saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester	100
Gambar 4.63 Diagram waktu tegangan saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester	102
Gambar 4.64 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban terhadap pemasangan arrester saat $R=50 \text{ ohm}$	103
Gambar 4.65 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban terhadap pemasangan arrester saat $R=101.35 \text{ ohm}$	103
Gambar 4.66 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban saat $R=50 \text{ ohm}$ terhadap pemasangan arrester	105
Gambar 4.67 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban saat $R=101.35 \text{ ohm}$ terhadap pemasangan arrester	105

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aslimeri., *“Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2”* Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [2] Artono Arismunandar., *“Teknik Tegangan Tinggi”*. Cetakan Ketiga. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1975.
- [3] Arismunandar A, *“Teknik Tenaga Listrik, jilid III Gardu Induk”*, Jakarta, Pradnya Paramita, 1979.
- [4] Zoro, Reynaldo, *“Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik”*. Catatan Kuliah, ITB, Indonesia,----
- [5] Hutauruk, T.S., *“Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja”*, Jakarta, Erlangga, 1989.
- [6] Kadir, Abdul, *“Transmisi Tenaga Listrik”*, UI-Press, 1998.
- [7] L. Tobing, Bonggas., *“Peralatan Tegangan Tinggi”*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [8] Negara, I Made Yulistya, *“Teknik Tegangan Tinggi: Prinsip dan Aplikasi Praktis”*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2013.
- [9] Wahyudi, *“Diktat Kuliah : Karakteristik dari Saluran Transmisi”*, Surabaya, ITS, 2013.
- [10] PT. PLN (P3B) Persero Region Jawa Timur dan Bali.
- [11] SPLN 121 , *“Konstruksi Saluran Udara 20 kV, 150 kV dan 500 kV dengan Tiang Beton/Baja”*, PT. PLN (PERSERO), 1996.
- [12] Ms,Dimpy Sood, *“Reduction of Switching Over Voltages in H.V. Transmission Line”*, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 6, June-2013 64 I ISSN 2229-5518 IJSER, 2013.
- [13] Rasool Feiz Kerendian, Samaneh Pazouki, Ali Rajabloo, *“Evaluation Methods of Limiting Switching Overvoltage during Line Energization”*, Islamic Azad University, South Tehran Branch (IAU), Tehran, Iran, International Journal of Scientific & Engineering Research vol. 2, issue 16, May 2013 ISSN: 2251-8843.
- [14] Schneiderelectric, *“Overvoltages and insulation coordination”*, 6 883 427/AE, ---.
- [15] Michael Gamlin, *“Impulse current testing”*, Haefely Test AG, Basle, Switzerland, Lightning Protection Forum Shanghai June 2004

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

RIWAYAT HIDUP



Mila Hikmatul Ulawia dilahirkan di kota Surabaya, 05 April 1991. Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Wardhani Surabaya dan SDN Pongangan 1 Gresik hingga lulus tahun 2004. Setelah itu penulis melanjutkan studi menengah pertama di SMP Negeri 1 Manyar Gresik. Tahun 2007, penulis diterima sebagai murid SMA Muhammadiyah 1 Gresik hingga lulus tahun 2009. Pada tahun yang sama penulis masuk ke D3 Teknik Kelistrikan Kapal - Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), dan mengambil program studi Teknik Kelistrikan Kapal hingga lulus pada tahun 2012. Setelah lulus program diploma kemudian penulis melanjutkan studi S1 melalui program Lintas Jalur di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) dengan NRP. 2212105058 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email mila.ulawia@gmail.com

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada sistem tenaga listrik, bagian yang terpenting dari penyaluran daya adalah transmisi. Bagian lainnya yang tidak kalah penting adalah gardu induk [1]. Suatu sistem tenaga listrik bisa mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan terhentinya penyaluran daya listrik. Pemakaian tegangan saluran transmisi yang tinggi, mengakibatkan tegangan lebih transien yang dialami oleh saluran transmisi tersebut akan semakin tinggi juga. Tegangan lebih tersebut bisa merusak peralatan isolasi jika magnitudo tegangannya melebihi BIL (*Basic Insulation Level*) peralatan isolasi yang dipakai. Tegangan lebih transien adalah tegangan yang mempunyai amplitudo sangat besar dan berlangsung sangat singkat yang disebabkan karena operasi pensaklaran (peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga). Tegangan lebih transient yang disebabkan oleh operasi pensaklaran disebut surja hubung. Surja hubung salah satunya disebabkan oleh proses pemberian tenaga (*energized*), yaitu proses mengalirinya sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban dengan sumber tegangan, melalui operasi penutupan saklar. Pada operasi pensaklaran (peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga) akan menghasilkan gejala surja hubung atau transien energi listrik, yang berupa tegangan lebih transien (*transients over voltage*) yang dapat berupa gelombang impuls yang mempunyai muka gelombang dan ekor gelombang. Tegangan ini sangat tergantung pada tegangan sistem, makin tinggi tegangan sistem yang digunakan maka makin tinggi pula tegangan transien akibat surja hubung yang timbul. Kenaikan tegangan yang terjadi karena surja hubung harus diperhatikan jangan sampai menyebabkan kerusakan koordinasi isolasi peralatan pada sistem. Untuk mengurangi tegangan lebih surja hubung dibutuhkan suatu letak pemasangan surja arrester yang optimal di saluran transmisi. Tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan lebih transien yang terjadi karena proses operasi penutupan CB (*circuit breaker*) dan lokasi pemasangan surja arrester yang optimal di saluran transmisi, dengan memakai program simulasi ATP/EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Untuk obyek penelitian ini diambil data dari saluran transmisi 150 kV.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah mengetahui gejala transien akibat surja hubung (*switching*) dan pengaruh lokasi pemasangan surja arrester sebagai alat pelindung terhadap gangguan surja hubung dengan menggunakan *software* ATP/EMTP.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diambil pada tugas akhir ini adalah jaringan transmisi yang digunakan merupakan saluran udara tegangan tinggi dengan arrester yang dipakai adalah MOV (*Metal Oxide*) dan parameter yang akan dianalisis adalah tegangan dan waktu.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam pembuatan tugas akhir ini adalah membuat pemodelan SUTT sirkuit tunggal, menganalisis pengaruh tegangan lebih akibat surja hubung (*switching*) dan mengetahui pengaruh lokasi pemasangan surja arrester.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bab dan diuraikan dengan pembahasan sesuai daftar isi. Sistematika penyusunan laporannya adalah sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Pendahuluan menguraikan tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, serta relevansi.

BAB 2 TEGANGAN LEBIH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Bab ini membahas teori-teori tentang sistem tenaga listrik, terutama mengenai SUTT, gangguan akibat operasi *switching*, tegangan lebih *switching*, dan penanggulangannya menggunakan surja arrester.

BAB 3 PEMODELAN SALURAN TRANSMISI (SUTT) 150KV

Bab ini membahas pemodelan gardu induk 150 kV sehingga dapat diketahui parameter yang dipakai untuk mengisi LCC pada *software* ATP serta mengetahui pemodelan pengisian karakteristik arrester.

BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi pengaruh lokasi pemasangan surja arrester dengan menggunakan *software* ATP/EMTP. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mendapatkan suatu kesimpulan. Data yang dianalisis adalah lokasi pemasangan surja arrester di beberapa lokasi mulai dari dekat sumber gangguan surja hubung (*switching*) hingga lokasi dekat peralatan.

BAB 5 PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang dapat menggambarkan hasil dari tugas akhir. Kesimpulan ini berisi lokasi pemasangan surja arrester yang optimal dan juga saran yang sangat diperlukan dalam pengembangan tugas akhir ini.

--- *Halaman ini sengaja dikosongkan* ---

BAB 2

TEGANGAN LEBIH PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum pengertian sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan tenaga listrik dan pusat beban yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga menjadi satu unit yang terkoneksi. Sistem tenaga listrik terdiri atas empat bagian, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan konsumen tenaga listrik. Pada sistem tenaga listrik di Indonesia, tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dinaikkan melalui transformator penaik tegangan (*step-up*) untuk ditransmisikan. Letak pembangkit tenaga listrik biasanya jauh dari pusat-pusat pemakai seperti kota dan industri sehingga energi listrik yang dihasilkan di pembangkit tenaga listrik disalurkan ke pemakai tenaga listrik. Sistem transmisi di Indonesia menggunakan sistem transmisi 150kV atau disebut dengan saluran udara tegangan tinggi (SUTT), dan 500kV atau yang biasa disebut saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Pada suatu sistem yang cukup besar, tegangan yang keluar dari generator harus dinaikkan terlebih dahulu dari tegangan generator (tegangan menengah) menjadi tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi sehingga untuk menyalurkan energi listrik dengan jarak yang jauh, harus dengan tegangan tinggi untuk memperkecil kerugian-kerugian yang terjadi, baik kerugian energi maupun penurunan tegangan. Tenaga listrik harus disalurkan melalui sistem transmisi seperti saluran transmisi, gardu induk (GI), dan saluran distribusi sehingga jika salah satu bagian dari sistem transmisi yang mengalami gangguan akan berdampak pada bagian transmisi yang lainnya, maka saluran transmisi, gardu induk dan saluran distribusi merupakan satu unit yang harus dikelola dengan baik. [1]

2.1.1 Klasifikasi Tegangan

Tegangan yang ada dalam sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi empat bagian. Antara satu negara dengan negara yang lain mempunyai standar yang berbeda-beda dalam menentukan klasifikasi

tegangan. Besar masing-masing tegangan yang dipakai di Indonesia adalah : [1]

- Tegangan Rendah : 220/380 Volt
- Tegangan Menengah : 6 kV, 20 kV
- Tegangan Tinggi : 70 kV, 150 kV
- Tegangan Ekstra tinggi : 275kV, 500 kV

2.1.2 Tegangan Tinggi

Tegangan tinggi adalah tegangan yang dianggap cukup tinggi, sehingga diperlukan pengujian dan pengukuran dengan tegangan tinggi yang semuanya bersifat khusus dan memerlukan teknik-teknik tertentu (subjektif) atau dimana gejala-gejala tegangan tinggi mulai terjadi (objektif). Tegangan tinggi yang diterapkan atau dialami oleh sistem tenaga antara lain: [2]

- Tegangan biasa (normal) yaitu tegangan yang seharusnya dapat ditahan oleh sistem tersebut untuk waktu tak terhingga.
- Tegangan lebih (*overvoltage*) yang hanya dapat ditahan untuk waktu terbatas. Tegangan lebih dapat dibagi menjadi dua golongan berdasarkan bentuknya yaitu tegangan periodik dan tegangan aperiodik, berdasarkan sebabnya yaitu *External overvoltage* misalnya petir dan *Internal overvoltage* misalnya *switching surge* (surja hubung).

Klasifikasi menurut *International Electrotechnical Commission* (IEC) adalah tegangan lebih petir, tegangan lebih surja hubung dan tegangan lebih sementara (*temporer*), misal tegangan lebih fasa ke tanah atau fasa-fasa yang berosilasi.

2.2 Saluran Transmisi

Sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran transmisi. Saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi tenaga, maka untuk mengatasi hal tersebut tenaga yang akan dikirim dari pusat pembangkit ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi (EHV). Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Komponen-komponen utama saluran udara terdiri dari: [1]

- Menara transmisi atau tiang transmisi berfungsi menopang konduktor yang menyalurkan energi listrik. Jenis-jenis dari bangunan penopang adalah menara-menara baja, tiang-tiang baja, tiang-tiang beton bertulang dan tiang-tiang kayu. Daerah yang peka terhadap petir digunakan kawat petir.
- Isolator adalah media penyekat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan dan berfungsi untuk mengisolir kawat fasa dengan tower. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut penggunaan dan konstruksi, jenis isolator diklasifikasikan antara lain: isolator pasak (*pin insulator*, *pin post insulator*, *line post insulator*), isolator tarik (pos-saluran) dan isolator gantung. Isolator dipasang atau digantung pada *travers* (*cross arm*) menara atau tiang transmisi.
- Kawat Konduktor digunakan untuk menghantarkan listrik yang ditransmisikan. Jenis kawat penghantar yang digunakan untuk adalah tembaga dengan konduktivitas 100%, tembaga dengan konduktivitas 97.5% atau aluminium dengan konduktivitas 61%. Kawat Penghantar aluminium terdiri dari:
 - AAC=*All-Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
 - AAAC=*All-Aluminium-Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminaum.
 - ACSR=*Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
 - ACAR=*Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, di mana jarak antara dua tiang atau menara (jaraknya ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.
- Kawat petir (*groundwire*) atau kawat pelindung (*shield wires*) yang berfungsi untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat-kawat fasa terhadap sambaran petir saat terjadi gangguan (sambaran) petir secara langsung. Kawat tanah dipasang diatas kawat fasa.

2.3 Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)

Saluran Udara Tegangan Tinggi merupakan salah satu jenis saluran tenaga listrik yang digunakan untuk keperluan transmisi tenaga listrik dalam jarak yang sangat jauh dari pusat pembangkit energi listrik ke pusat beban. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) menggunakan tegangan 150 kV dalam proses penyaluran tenaga listrik ke pusat beban dari stasion pembangkit energi listrik. Jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) adalah konstruksi tower besi baja yang paling banyak digunakan di jaringan PLN, karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah. Jenis menara yang digunakan di Indonesia adalah *tower Lattice*. Pada sistem arus putar, keluaran dari generator berupa tiga fasa, setiap fasa mempunyai sudut pergerseran fasa 120° sehingga kontruksi menara tersebut adalah urutan fasa secara vertikal, dimana fasa R berada di atas diikuti fasa S dan fasa T. [11]



Gambar 2.1 Menara jenis *lattice*

Menurut susunan atau konfigurasi kawat fasa, menara listrik dikelompokkan atas:

- Jenis delta, digunakan pada konfigurasi horizontal atau mendatar.
- Jenis piramida, digunakan pada konfigurasi vertikal atau tegak.
- Jenis Zig-zag, yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan menara.

Dari menara yang digunakan pada transmisi tegangan tinggi masing-masing memiliki fungsi tersendiri berdasarkan tipe menara *Lattice* pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tipe menara 150 kV

Tipe Tower	Fungsi	Sudut
Aa	Suspension	$0^{\circ} - 3^{\circ}$
Bb	Tension/section	$3^{\circ} - 20^{\circ}$
Cc	Tension	$20^{\circ} - 60^{\circ}$
Dd	Tension	$60^{\circ} - 90^{\circ}$
Ee	Tension	$> 90^{\circ}$
Ff	Tension	$> 90^{\circ}$
Gg	Transposisi	-

Konstruksi menara dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Menara 4 sirkit tipe suspension dan tension

Konduktor adalah media yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dari pembangkit energi listrik dari pembangkit energi listrik ke beban (Gardu Induk) atau dari GI ke GI lainnya, yang terlentang pada tower-tower. Konduktor pada *tower suspension* dipegang oleh *suspension clamp*, namun pada *tower tension* dipegang oleh *tension clamp*. Dib belakang *clamp* tersebut dipasang rencengan isolator yang

terhubung ke tower, namun kawat tanah atau *groundwire* (kawat petir atau kawat tanah) adalah media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat.

Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya. Jika kawat terlalu kecil maka kawat akan panas dan rugi transmisi akan besar. Pada tegangan yang tinggi (SUTT) penampang kawat, jumlah kawat maupun jarak antara kawat berkas mempengaruhi besarnya korona dengan bunyi desis atau berisik. Jarak kawat antar fasa SUTT adalah 6 meter, hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan *flashover* antar fasa.

Jumlah Kawat Tanah paling tidak ada satu buah diatas kawat fasa, namun umumnya di setiap menara dipasang dua buah. Pemasangan yang hanya satu buah untuk dua penghantar akan membuat sudut perlindungan menjadi besar sehingga kawat fasa mudah tersambar petir. Jarak antara kawat tanah (*ground wire*) dengan kawat fasa di menara adalah sebesar jarak antar kawat fasa, namun pada daerah tengah gawangan dapat mencapai 120% dari jarak tersebut.

Pada umumnya SUTT menggunakan ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Bagian dalam kawat berupa steel yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya mempunyai konduktifitas tinggi. Karena sifat elektron lebih menyukai bagian luar kawat daripada bagian sebelah dalam kawat maka ACSR cocok dipakai pada SUTT. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu kawat steelnya dilapisi dengan almunium. Pada saluran transmisi yang perlu dinaikkan kapasitas penyalurannya namun SUTT tersebut berada didaerah yang rawan longsor, maka dipasang konduktor jenis TACSR (*Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced*) yang mempunyai kapasitas besar tetapi berat kawat tidak mengalami perubahan yang banyak. Konduktor pada SUTT merupakan kawat berkas (*stranded*) atau serabut yang dipilin, agar mempunyai kapasitas yang lebih besar dibanding kawat pejal.^[12]

Pada sistem arus putar, keluaran dari generator berupa tiga fasa, setiap fasa mempunyai sudut pergerseran fasa 120°. Pada SUTT dikenal fasa R, S dan T yang urutan fasanya selalu R diatas, S ditengah dan T

dibawah. Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya. Jika kawat terlalu kecil maka kawat akan panas dan rugi transmisi akan besar. Pada tegangan yang tinggi (SUTET) penampang kawat, jumlah kawat maupun jarak antara kawat berkas mempengaruhi besarnya corona yang ditengarai dengan bunyi desis atau berisik.

Jarak kawat antar fasa SUTT 70 kV idealnya adalah 3 meter, SUTT = 6 meter dan SUTET = 12 meter. Hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan flash over antar fasa. Perlengkapan atau fitting kawat penghantar adalah: *Spacer*, *vibration damper*. Untuk keperluan perbaikan dipasang *repair sleeve* maupun *armor rod*. Sambungan kawat disebut *mid span joint*. *Repair sleeve* adalah selongsong aluminium yang terbelah menjadi dua bagian dan dapat ditangkapi pada kawat penghantar, berfungsi untuk memperbaiki konduktifitas kawat yang rantas, Cara pemasangannya dipress dengan *hydraulic* tekanan tinggi. Bola Pengaman pada Tower SUTT yang berfungsi sebagai rambu peringatan terhadap lalu lintas udara, berfungsi juga untuk memberi tanda kepada pilot pesawat terbang bahwa terdapat kawat transmisi. Bola pengaman dipasang pada ground wire pada setiap jarak 50 m hingga 75 m sekitar lapangan/bandar udara. Lampu Aviasi adalah rambu peringatan berupa lampu terhadap lalu lintas udara, berfungsi untuk memberi tanda kepada pilot pesawat terbang bahwa terdapat kawat transmisi. Jenis lampu aviasi adalah sebagai berikut:

- Lampu aviasi yang terpasang pada tower dengan suplai dari jaringan tegangan rendah.
- Lampu aviasi yang terpasang pada kawat penghantar dengan sistem induksi dari kawat penghantar.

Arching Horn, adalah peralatan yang dipasang pada sisi *Cold (tower)* dari rencengan isolator. Fungsi *arching horn* sebagai berikut:

- Media pelepasan busur api dari tegangan lebih antara sisi *Cold* dan *Hot* (kawat penghantar).
- Pada jarak yang diinginkan berguna untuk memotong tegangan lebih bila terjadi: sambaran petir, *switching*, dan gangguan,

sehingga dapat mengamankan peralatan yang lebih mahal di Gardu Induk (Trafo).

Media semacam *arcing horn* yang terpasang pada sisi *Hot* (kawat penghantar) adalah:

- *Guarding ring* : berbentuk oval, mempunyai peran ganda yaitu sebagai *arcing horn* maupun pendistribusi tegangan pada beberapa isolator sisi *hot*. Umumnya dipasang di setiap tower tension maupun suspension sepanjang transmisi.
- *Arcing ring* : berbentuk lingkaran, mempunyai peran ganda yaitu sebagai *arcing horn* maupun pendistribusi tegangan pada beberapa isolator sisi *hot*. Umumnya hanya terpasang di tower *dead end* dan *gantry* gardu induk.

Kawat Tanah atau *Earth wire* (kawat petir atau kawat tanah) adalah media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat. Namun jika petir menyambar dari samping maka dapat mengakibatkan kawat fasa tersambar dan dapat mengakibatkan terjadinya gangguan. Kawat pada *tower tension* dipegang oleh *tension clamp*, sedangkan pada *tower suspension* dipegang oleh *suspension clamp*. Pada *tension clamp* dipasang kawat *jumper* yang menghubungkannya pada tower agar arus petir dapat dibuang ke tanah lewat tower. Untuk keperluan perbaikan mutu pentanahan maka dari kawat *jumper* ini ditambahkan kawat lagi menuju ke tanah yang kemudian dihubungkan dengan kawat pentanahan.

Isolator yang digunakan pada SUTT merupakan isolator piring dengan menyesuaikan jumlah piringan isolator terhadap tegangan sistem. Pada isolator piring ini dilengkapi dengan tanduk yang melindungi isolator dari surja petir dan surja hubung yang dinamakan dengan *arching hor*. Besarnya nilai isolasi pada umumnya 3-3,3 kali tegangan sistem, hal ini dimaksudkan akan tahan terhadap muka tegangan petir pada waktu $1,2\mu s$ dan tegangan surja hubung pada waktu $250\mu s$. Apabila nilai isolasinya turun akibat dari polutan maupun kerusakan pada isolasinya, maka akan terjadi kegagalan isolasi yang akhirnya dapat menimbulkan gangguan.

2.4 Sistem Tegangan Lebih

Suatu sistem tenaga listrik bisa mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan terhentinya penyaluran daya listrik. Salah satu penyebab gangguan yang mungkin terjadi adalah rusaknya sistem isolasi karena pengaruh tegangan lebih akibat operasi pensaklaran maupun akibat surja hubung. Oleh karena itu, dalam pengoperasian sistem tenaga listrik perlu perhatian khusus pada sistem proteksi terhadap tegangan lebih. Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditahan untuk waktu yang terbatas atau tegangan lebih juga bisa diartikan sebagai tegangan pada sistem tenaga listrik yang bersifat temporer dan nilainya melebihi tegangan puncak maksimum. Tegangan ini akan menyebabkan kerusakan pada isolasi peralatan [4]. Dilihat dari sumbernya tegangan lebih dibagi dua jenis yaitu: [2]

- Tegangan lebih internal merupakan tegangan lebih sementara berfrekuensi daya dan tegangan lebih transient. Tegangan lebih berfrekuensi daya terjadi akibat hubung singkat satu fasa ke tanah, resosansi, pelepasan beban tiba-tiba, dan transmisi panjang berbeban rendah. Besaran tegangan lebih frekuensi daya akibat hubung singkat satu fasa ke tanah bergantung pada lokasi gangguan, *grounding netral*, dan parameter impedansi sistem. Pada tegangan lebih transient terjadi karena adanya operasi hubung buka (*switching operation*) pada sistem ketika pemutusan arus kapasitif dan induktif, pelepasan beban, pengisoliran gangguan dan energisasi atau re-energisasi jaringan. Tegangan akibat operasi hubung-buka pemutus disebut tegangan impuls hubung-buka.
- Tegangan lebih eksternal merupakan tegangan impuls yang terjadi pada sistem tenaga listrik akibat sambaran petir pada SUTT. Tegangan lebih ini berbentuk gelombang impuls yang merambat menuju ujung-ujung transmisi.

Tegangan lebih berdasarkan sumbernya menurut IEC, ditimbulkan oleh :

- Tegangan lebih petir (*lightning over voltage*) pada peralatan listrik akibat sambaran langsung, tidak langsung, maupun secara induksi.
- Tegangan lebih surja hubung (*switching over voltage*) baik akibat operasi penutupan maupun operasi pembukaan.
- Tegangan lebih sementara (*temporary voltage*) yang disebabkan oleh sistem.

Magnitude tegangan lebih tersebut di atas sangat berpengaruh terhadap ketahanan isolasi peralatan. Ketahanan isolasi peralatan sistem tenaga listrik terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh surja hubung disebut tingkat isolasi dasar (TID) atau *basic insulation level* (BIL) yaitu kekuatan isolasi impuls referensi level yang menurut IEC-71-1 dinyatakan dalam impuls *crest-voltage* dengan bentuk gelombang standar 1,2/50 μ s. Ketahanan isolasi terhadap surja hubung disebut *switching insulation level* (SIL), yaitu tingkat ketahanan isolasi terhadap surja hubung dengan bentuk gelombang standar 250x25000 μ s. Menurut IEC (*international elektrotechnical commision*) besarnya BIL dan SIL untuk peralatan bertegangan 525kV adalah 1425kV dan 1175kV. Tingkat ketahanan isolasi pada suatu sistem tenaga listrik biasanya ditentukan oleh tegangan lebih petir, surja hubung dan frekuensi. Durasi dan amplitudo masing-masing tegangan seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 Durasi dan besaran tegangan pada sistem tenaga listrik

Pada gambar 2.3, amplitudo tegangan dinyatakan dalam per-unit puncak tegangan maksimum fasa ke tanah sistem. Jika tegangan maksimum sistem sama dengan V_{maks} , maka tegangan maksimum fasa ke tanah sistem sama dengan $V_{maks}/\sqrt{3}$. Dengan demikian puncak tegangan maksimum fasa ke tanah sama dengan $V_p = (\sqrt{2} V_{maks})/\sqrt{3}$. Nilai V_p diambil sama dengan 1,0 pu. Ada tiga bahaya yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik akibat tegangan lebih impuls petir :

- Jika sistem pembumian menara transmisi buruk, maka arus petir yang mengalir melalui menara akan menimbulkan tegangan yang tinggi pada puncak menara, sehingga beda potensial yang dipikul isolator transmisi naik dan dapat menimbulkan peristiwa *flashover* pada isolator tersebut.
- Jika suatu tegangan impuls petir tiba di suatu gardu maka tegangan lebih tersebut akan merusak isolasi peralatan yang terdapat pada gardu.
- Jika gelombang tegangan impuls petir merambat menuju ujung jaringan transmisi yang terbuka, maka gelombang tegangan impuls petir akan dipantulkan, merambat kembali menuju titik sambaran sehingga tegangan pada titik pantulan menjadi dua kali tegangan impuls petir yang akan datang.

Pada gangguan pada jaringan dan pengoperasian kontak dapat menimbulkan osilasi yang berhubungan dengan transien tegangan lebih [8]. Adapun penyebab dari tegangan lebih ini adalah:

- pemasangan penghantar panjang tanpa beban
- pemutusan arus induktif
- pentanahan pada jaringan (tergantung cara pentanahan pada rangkaian bintang)
- tegangan lebih akibat resonansi

Panjang tegangan lebih dapat mencapai beberapa periode. Hal ini dapat dikurangi dengan beberapa cara seperti:

- penggunaan pemutus daya yang baik (tanpa arus balik)
- pemberian melalui tahanan
- menggunakan tahanan pentanahan yang kecil pada titik bintang jaringan

2.5 Surja Hubung

Surja hubung dapat diartikan sebagai gejala tegangan lebih transien yang disebabkan oleh proses surja hubung pada sepanjang saluran transmisi yang mempunyai amplitudo lebih besar dari nilai puncak tegangan nominalnya atau dapat dijelaskan yaitu gejala transien yang disebabkan oleh pemasukan energi (*energization*), pemutusan energi (*de-energization*) dan pemutusan disertai pemasukan kembali energi (*re-energization*) dari suatu rangkaian listrik. Salah satu sumber tegangan lebih surja hubung adalah peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga. Proses pensaklaran dilakukan oleh saklar atau *circuit breaker* berupa operasi penutupan (*closing*), pembukaan (*opening*), dan penutupan kembali (*reclosing*). Operasi-operasi tersebut dikenal dengan istilah operasi *switching* [2]. Kenaikan tegangan yang terjadi karena surja hubung harus diperhatikan jangan sampai menyebabkan kerusakan koordinasi isolasi peralatan pada sistem.

Beberapa kemungkinan penyebab terjadinya surja *switching* pada sistem tenaga [3] :

- Pengisian saluran transmisi dan kabel.
 - Pengisian saluran yang sisi jauhnya terbuka
 - Pengisian saluran yang memiliki terminal trafo pada keadaan tak berbeban
 - Pengisian saluran melalui sisi tegangan rendah trafo
- Pengisian kembali saluran.
Pengisian saluran transmisi ketika digunakan *recloser* kecepatan tinggi.
- *Load rejection*.
Ini dipengaruhi oleh pembukaan circuit breaker pada ujung saluran yang jauh. Ini dapat juga diikuti pembukaan saluran pada ujung sisi kirim.
- Proses *switching* “on-off” dari peralatan.
Semua operasi *switching* pada elemen jaringan transmisi akan menghasilkan surja, terutama pengoperasian peralatan berikut :
 - *switching reactor* tegangan tinggi
 - *switching* trafo yang dibebani oleh reactor pada belitan tersiernya
 - *switching* pada trafo tak berbeban

- Pada saat terjadi kegagalan atau pemutusan sistem yang mengalami kegagalan.

Bentuk gelombang surja hubung dapat didefinisikan sebagai tegangan impuls yaitu, tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol, yang dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut [2] :

$$V = V_O (e^{-at} - e^{-bt}) \quad 2.1$$

dengan :

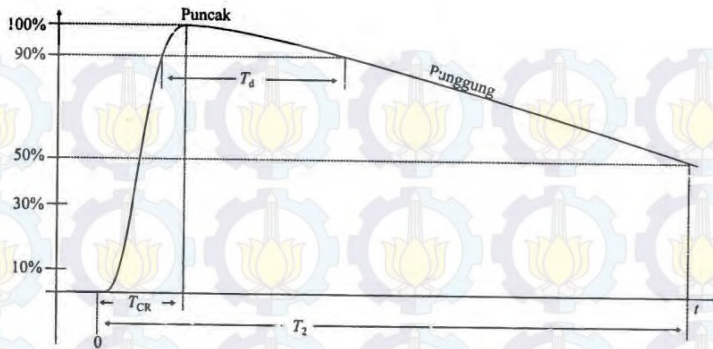
V = tegangan osilasi

V_O = tegangan sistem

a dan b = konstanta yang diperoleh dari rangkaian

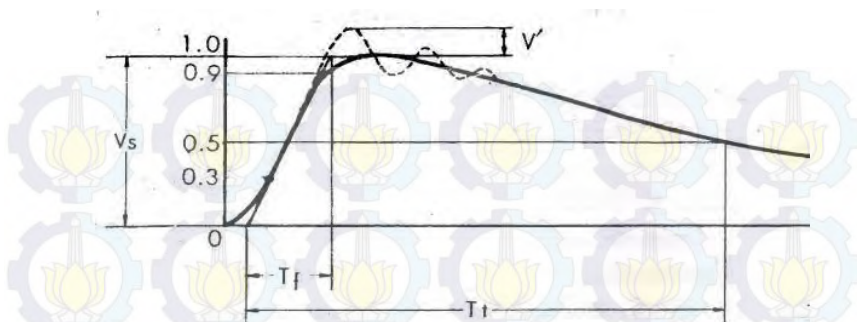
Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol nominal sampai ke titik puncak, sedangkan sisanya disebut ekor gelombang. Setengah puncak gelombang adalah titik-titik pada muka dan ekor dimana tegangannya adalah setengah puncak (titik 0.5). Waktu sampai puncak setengah puncak dari ekor gelombang didefinisikan sebagai waktu dari titik nol nominal sampai setengah puncak pada ekor. Kecuraman muka gelombang adalah kecepatan naiknya tegangan pada muka gelombang.

Kecuraman muka rata-rata untuk mudahnya dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan puncak dan lamanya muka gelombang. Gelombang penuh adalah gelombang yang tidak terputus karena lompatan api atau tembusan, mempunyai waktu muka-gelombang T_{cr} (μs). Gelombang ini dinyatakan dengan huruf: $\pm (T_{cr} \times T_2) \mu s$ dengan polaritasnya. Besaran waktu standar untuk tegangan impuls surja hubung menurut IEC adalah 250/2500 μs . Dengan $T_{cr} = T_1 = 250 \mu s \pm 20\%$ dan $T_2 = 2500 \mu s \pm 60\%$. Bentuk standarisasi gelombang tegangan impuls surja hubung dapat ditunjukkan pada gambar 2.4 [8].



Gambar 2.4 Standar tegangan impuls *switching*

Waktu ke puncak T_{cr} diperoleh dari rentang waktu antara awal impuls dan tercapainya nilai puncak. Osilasi frekuensi tinggi saat pembangkitan tegangan impuls masih ada akan tetapi hal ini tidak berpengaruh karena konstanta waktu tegangan impuls surja hubung jauh lebih besar dari osilasi ini. Waktu punggung T_2 , adalah waktu antara mulainya tegangan impuls sampai dengan 50% nilai tegangan pada punggung impuls. Toleransi nilai puncak tegangan impuls surja hubung harus tetap 3%. Permasalahan penentuan nilai puncak seperti pada tegangan impuls surja hubung tidak ditemui karena proses osilasi telah hilang saat mencapai nilai puncak. Besaran lain yang biasa melengkapi besaran tegangan impuls kontak adalah waktu puncak (T_d) yang didefinisikan sebagai rentang waktu dimana nilai tegangan lebih besar dari 90%. Besarnya (amplitudo) osilasi frekuensi tinggi (v') pada muka gelombang menurut standar IEC harus kurang dari 5% dari harga puncak disekitar puncak yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bentuk tegangan impuls

dimana :

- V_s = tegangan puncak
- T_t = ekor gelombang
- T_f = muka gelombang
- V' = kelebihan tegangan $\pm 0.05 \times V_s$

Besarnya surja hubung dinyatakan oleh suatu faktor tegangan lebih yang sesuai persamaan: [1]

$$k_{ft} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_{maks}}{E} \quad 2.2$$

Keterangan:

- k_{ft} = factor tegangan lebih fasa ke tanah
- E_{maks} = tegangan maksimum setelah *switching*
- E = tegangan sistem fasa ke fasa sebelum operasi *switching*

2.6 Transien

Menurut Joseph A. Edminister (1995), transien adalah periode peralihan selama arus-arus cabang dan tegangan-tegangan elemen berubah dari nilai semula menjadi nilai baru akibat dari perubahan sumber tegangan atau perubahan elemen-elemen rangkaian dan setelah transien berlalu, keadaan rangkaian disebut tunak (*steady state*). Pada saat terjadi transien, komponen-komponen dalam sistem tenaga listrik mengalami tekanan yang sangat besar berupa arus dan tegangan. Tegangan yang ditimbulkan berupa tegangan lebih transien

dan magnitudenya dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen sistem.

2.6.1 Transien pada rangkaian R-L



Gambar 2.6 Rangkaian R-L seri

Bila $V = V_m \sin(\omega t + \theta)$ dimasukkan ke dalam rangkaian dengan cara menutup saklar S pada $t = 0$, maka tegangan yang terpasang pada rangkaian adalah $V_m \sin \theta$. Hal ini karena S menutup pada titik tertentu, sudut θ akan mempunyai nilai dari θ sampai 2π . Resultan arus (i) terdiri dari arus steady state (i_s) arus transien (i_t), sehingga $i = i_s + i_t$. Harga maksimal arus steady state adalah :

$$I_m = \frac{V_m}{R^2 + X_1^2} = \frac{V_m}{Z} \quad 2.3$$

Z merupakan impedansi rangkaian. Arus tertinggal terhadap tegangan sebesar θ dengan $\theta = X_l / R$ atau $\theta = \tan^{-1}(X_l / R)$. Persamaan untuk harga sesaat dari arus steady state menjadi :

$$I_s = I_m \sin \{ \sin \omega t + (\theta - \Phi) \} \quad 2.4$$

Sedangkan arus transient dirumuskan sebagai berikut :

$$i_t = I_0 \cdot e^{-t/\lambda} \quad 2.5$$

Sehingga arus resultannya menjadi :

$$i = I_m \sin\{\sin \omega t + (\theta - \Phi)\} + I_0 e^{-t/\lambda} \quad 2.6$$

Untuk $t = 0$ dan $i = 0$, diperoleh :

$$0 = I_m \sin(\theta - \Phi) + I_0 \quad 2.7$$

Sehingga :

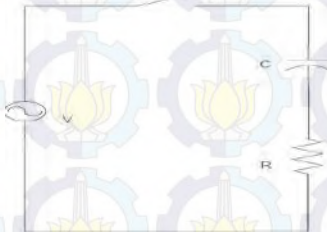
$$I_0 = -I_m \sin(\theta - \Phi) \quad 2.8$$

Maka persamaan arus resultannya menjadi :

$$i = I_m \sin\{\sin \omega t + (\theta - \Phi)\} - \{I_m \sin(\theta - \Phi)\} e^{-t/\lambda} \quad 2.9$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa bentuk gelombang arus resultan dipengaruhi oleh sudut θ dan waktu pada saat saklar S ditutup.

2.6.2 Transien pada rangkaian R-C



Gambar 2.7 Rangkaian R-C seri

Pada kasus ini, resultan arus didefinisikan sama seperti pada rangkaian R-L yaitu :

$$\begin{aligned} I &= i_s + i_t \\ &= I_m \sin\{\sin \omega t + (\theta - \Phi)\} + I_0 e^{-t/\lambda} \end{aligned}$$

dimana :

$$I_m = \sqrt{V_m/R^2 + X_C^2}$$

$$V = V_m \sin(\omega t + \theta)$$

Nilai I_0 diperoleh dari kondisi mula-mula ($t = 0, i = 0$) dengan $I_0 = -I_m \sin(\theta - \Phi)$ sehingga resultannya menjadi:

$$i = I_m \sin\{\sin \omega t + (\theta - \Phi)\} - \{I_m \sin(\theta - \Phi)\}e^{-t/\lambda} \quad 2.10$$

2.6.3 Transien pada rangkaian R-L-C

Rangkaian RLC seperti terlihat pada gambar, baik energi elektromagnetik maupun elektrostatik terlibat di dalamnya, sehingga perubahan kondisi yang mendadak pada rangkaian melibatkan redistribusi kedua bentuk energi tersebut. Arus transien yang dihasilkan karena redistribusi ini dikenal dengan sebutan transien energi ganda (*double energi transient*). Arus yang dihasilkan sebagai arus non direksional atau arus osilasi yang menurun. Dalam rangkaian RLC tegangan transien terjadi pada ketiga parameter rangkaian, sehingga persamaan tegangan transienya adalah : $i.R + L di/dt + q/C = 0$, diperoleh persamaan diferensial sebagai berikut :

$$d^2 i/dt^2 + R/L di/dt + i/LC = 0 \quad 2.11$$

Penyelesaian dari persamaan di atas adalah $i_t = k_1 e^{\lambda_1 t} + k_2 e^{\lambda_2 t}$, di mana k_1 dan k_2 adalah konstanta rangkaian. Sedangkan nilai λ_1 dan λ_2 ditentukan oleh persamaan :

$$\lambda_1 = -R/2L + (R^2/4L^2)^{1/2} - (1/LC) \quad 2.12$$

$$\lambda_2 = -R/2L - (R^2/4L^2)^{1/2} - (1/LC) \quad 2.13$$

Sesuai dengan nilai λ_1 dan λ_2 ada empat kondisi rangkaian RLC yang berbeda yaitu pada saat $R = 0, 1/LC < R^2/4L^2, 1/LC > R^2/4L^2$, dan pada saat $1/LC = R^2/4L^2$.

2.7 Analisis Transien

Gejala tegangan lebih transien akibat surja hubung pada saluran transmisi dapat diselesaikan dengan membuat rangkaian ekuivalen satu fasa, sehingga tiga fasa saluran transmisi diasumsikan sebagai satu fasa tunggal. Metode rangkaian fasa tunggal ini dapat

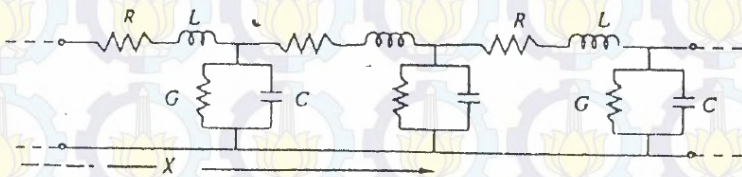
digunakan untuk menentukan tegangan lebih transien pada saluran transmisi, jika dilakukan pendekatan, pemutus tenaga pada masing-masing fasa menutup secara serentak. Tegangan lebih transien yang terjadi pada saluran transmisi bertambah nilainya, karena adanya sifat yang saling berhubungan satu sama lain pada saluran 3 fasa. Pemutus tenaga yang terdapat pada jaringan 3 fasa, pada hakikatnya menutup secara tidak serentak (*non simultaneous*), sehingga nilai tegangan maksimum yang terdapat di sepanjang saluran bervariasi menurut waktu menutupnya pada masing-masing fasa [6].

2.7.1 Analisis Transien: Gelombang Berjalan

Jika suatu hantaran tenaga listrik (hantaran udara, kabel) yang digambarkan dengan dua kawat tiba-tiba dihubungkan dengan suatu sumber tegangan, maka seluruh saluran tersebut tidak akan langsung bertegangan sehingga masih diperlukan beberapa waktu untuk dapat merasakan tegangan ini pada suatu titik dalam sistem yang mempunyai jarak tertentu dari sumber tegangan tersebut. Hal ini disebabkan adanya induktansi dan kapasitansi pada sistem tanpa rugi-rugi (*loss less line*). Proses ini sama dengan peluncuran sebuah gelombang tegangan yang merambat sepanjang hantaran dengan kecepatan tertentu. Gelombang tegangan ini merambat bersamaan gelombang arus. Kedua gelombang ini akan mencapai ujung yang lain dari hantaran dalam waktu tertentu. Dalam perambatannya kedua gelombang ini umumnya akan menemukan diskontinuitas dalam hantaran sehingga terjadi pemantulan gelombang. Umumnya pada setiap saat, tegangan dan arus pada setiap titik merupakan superposisi dari gelombang datang dan gelombang pantul. Gelombang berjalan ini timbul dalam sistem transmisi sebagai akibat adanya tegangan lebih pada sistem yang disebabkan oleh proses sambaran petir atau proses *switching* (pembukaan dan penutupan saklar daya) [4].

Studi tentang surja hubung pada saluran transmisi adalah sangat kompleks, sehingga pada Tugas Akhir ini hanya mempelajari kasus suatu saluran yang tanpa rugi-rugi. Suatu saluran tanpa rugi-rugi adalah representasi yang baik dari saluran-saluran frekuensi tinggi di mana ωL dan ωC menjadi sangat besar dibandingkan dengan R dan G . Untuk surja hubung pada saluran transmisi daya, studi saluran tanpa rugi-rugi merupakan penyederhanaan yang memungkinkan untuk memahami beberapa gejala surja hubung tanpa terlalu melibatkan

pada teori-teori yang terlalu rumit. Pendekatan yang dipilih untuk persoalan ini sama seperti yang telah digunakan untuk menurunkan hubungan-hubungan tegangan dan arus dalam keadaan *steady state* untuk yang saluran panjang dengan konstanta-konstanta yang tersebar merata, maka mengukur jarak x sepanjang saluran dari ujung pengirim ke dalam elemen deferensial dengan panjang Δx yang diperlihatkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Model dari sebuah saluran transmisi

Keterangan gambar 2.8:

R = hambatan per satuan panjang

L = induktansi per satuan panjang

C = kapasitansi per satuan panjang

G = konduktansi per satuan panjang

Tegangan V dan I adalah fungsi-fungsi x dan t bersama-sama, sehingga perlu menggunakan turunan sebagian. Persamaan jatuh tegangan seri di sepanjang elemen saluran adalah:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x \quad 2.14$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left(Gv + C \frac{\partial V}{\partial t} \right) \Delta x \quad 2.15$$

Persamaan dan tersebut di atas dapat dibagi dengan Δx , dan karena hanya membahas suatu saluran tanpa rugi-rugi, maka R dan G akan sama dengan nol sehingga didapatkan :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad 2.16$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = C \frac{\partial V}{\partial t} \quad 2.17$$

Sekarang variabel i dapat dihilangkan dengan menghitung turunan sebagian kedua suku dalam persamaan (2.16) terhadap x dan turunan sebagian kedua suku dalam persamaan (2.17) terhadap t . Prosedur ini menghasilkan $\partial^2 i / \partial x \partial t$ pada kedua persamaan yang dihasilkan, dan dengan mengeliminasi turunan sebagian kedua dari variabel i dari kedua persamaan tersebut, didapatkan :

$$\frac{1}{LC} x \frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} = \frac{\partial^2 V}{\partial^2 t} \quad 2.18$$

Persamaan (2.18) ini adalah yang dinamakan persamaan gelombang berjalan suatu saluran tanpa rugi-rugi. Penyelesaian persamaan ini adalah fungsi dari $(x-vt)$, dan tegangannya dinyatakan dengan :

$$V = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad 2.19$$

Persamaan (2.19) Suatu penyelesaian untuk terjadinya komponen-komponen ke depan dan ke belakang sebuah gelombang berjalan secara bersamaan pada sebuah saluran tanpa rugi-rugi. Variabel v yang menyatakan kecepatan gelombang berjalan dapat dinyatakan dengan :

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 2.20$$

dengan :

v = kecepatan rambat gelombang (m/s)

L = induktansi saluran (H/m)

C = kapasitansi saluran (F/m)

Jika gelombang yang berjalan ke depan, yang disebut juga dengan gelombang datang, dinyatakan dengan :

$$V^+ = f_1(x-vt) \quad 2.21$$

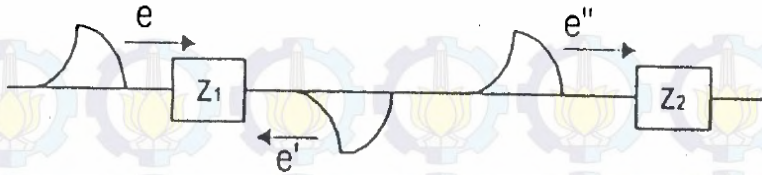
Suatu gelombang arus akan ditimbulkan oleh muatan-muatan yang bergerak dan dapat dinyatakan dengan :

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}} f_1(x - vt) \quad 2.22$$

Dari persamaan 2.21 dan 2.22 didapatkan bahwa :

$$\frac{V^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad 2.23$$

Perbandingan antara V dan i dinamakan impedansi karakteristik atau impedansi surja (Z_C) dari saluran tanpa rugi-rugi. Jika suatu tegangan $v(t)$ diterapkan pada salah satu ujung saluran transmisi tanpa rugi-rugi, unit kapasitasi C pertama dimuati pada tegangan $v(t)$. Kapasitansi ini kemudian meluahkan ke dalam unit kapasitansi berikutnya melalui induktansi L . proses bermuatan-peluahan (*charge-discharge*) ini berlanjut hingga ujung saluran dan energi gelombang dialihkan dari bentuk elektronik (dalam kapasitansi) ke bentuk magnetik (dalam induktansi). Jadi, gelombang tegangan bergerak maju secara gradual ke ujung saluran dengan menimbulkan gelombang arus ekivalen juga. Propagasi gelombang tegangan dan arus ini disebut gelombang berjalan (*travelling wave*) dan gelombang ini kelihatan seolah-olah tegangan dan arus berjalan sepanjang saluran dengan kecepatan yang diberikan oleh persamaan (2.20). Saat gelombang yang berjalan pada suatu saluran transmisi mencapai titik transisi, seperti suatu rangkaian terbuka, rangkaian hubungan singkat, suatu sambungan dengan saluran lain atau kabel, belitan mesin, dan lain-lain, maka pada titik itu terjadi perubahan parameter saluran. Akibatnya sebagian dari gelombang berjalan bergerak melewati bagian lain dari rangkaian. Pada titik transisi, tegangan atau arus dapat berharga nol sampai dua kali harga semula tergantung pada karakteristik teminalnya. Gelombang berjalan asal (*impinging wave*) disebut gelombang datang (*incident wave*) dan dua macam gelombang lain yang muncul pada titik transmisi disebut dengan gelombang pantul (*reflected wave*) dan gelombang maju (*transmitted wave*). Gelombang-gelombang tersebut diilustrasikan pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Gelombang pantul dan maju dari suatu gelombang datang pada titik sambungan dari dua impedansi yang berbeda

2.7.2 Analisis Transien: Gelombang Pantul

Jika suatu tegangan pertama-tama dihubungkan pada ujung pengirim suatu saluran transmisi yang ditutup dengan suatu impedansi Z_R . Jika saklar ditutup dan suatu tegangan terhubung pada suatu saluran, suatu gelombang tegangan V^+ mulai berjalan sepanjang saluran diikuti oleh suatu gelombang arus i^+ . Perbandingan antara V_R dan i_R di ujung saluran pada setiap saat harus sama dengan resistansi penutup Z_R . Oleh karena itu kedatangan V^+ dan i^+ di ujung penerima di mana nilai-nilainya adalah V_R^+ dan i_R^+ harus menimbulkan gelombang-gelombang yang berjalan ke belakang atau gelombang-gelombang pantulan V^- dan i^- yang nilai-nilainya di ujung adalah V_R^- dan i_R^- sedemikian sehingga,

$$\frac{V_R^+}{i_R^+} = \frac{V_R^+ + V_R^-}{i_R^+ + i_R^-} \quad 2.24$$

di mana V_R^- dan i_R^- adalah gelombang-gelombang V^- dan i^- yang diukur pada ujung penerima. Jika dibuat $Z_c = \sqrt{L/C}$, didapat persamaan 2.25 dan 2.26.

$$i_R^+ = \frac{V_R^+}{Z_c} \quad 2.25$$

$$i_R^- = \frac{V_R^-}{Z_c} \quad 2.26$$

Kemudian dengan memasukkan nilai iR^+ dan iR^- ke dalam persamaan (2.24) dihasilkan persamaan :

$$VR^- = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} VR^+ \quad 2.27$$

Koefisien pantulan ρ_R untuk tegangan pada ujung penerima saluran didefinisikan sebagai VR^-/VR^+ , jadi :

$$P_R = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} \quad 2.28$$

dimana:

ρ_R = koefisien pantulan pada ujung penerima

Z_R = impedansi ujung penerima

Z_C = impedansi karakteristik (impedansi surja)

Jika saluran ditutup dengan impedansi karakteristiknya Z_C , terlihat bahwa koefisien pantulan untuk sama dengan nol, sehingga tidak ada gelombang pantulan, dan saluran berlaku seakan-akan panjangnya tidak terhingga. Jika ujung saluran merupakan suatu rangkaian terbuka Z_R adalah tak terhingga dan didapatkan harga ρ_R sama dengan 1 (satu). Dengan demikian tegangan yang terjadi pada ujung penerima menjadi 2 kalinya tegangan pada sumber tegangan atau pada ujung pengirim. Dari uraian di atas bisa disimpulkan bahwa besar tegangan lebih transien sangat tergantung pada impedansi karakteristik $Z_c = \sqrt{L / C}$, dimana impedansi karakteristik tersebut sangat berpengaruh terhadap koefisien pantulan ρ_R . Semakin besar nilai C (kapasitansi saluran) maka akan semakin besar juga tegangan lebih transien yang ditimbulkan. Tetapi tegangan lebih transien tersebut dapat diperkecil dengan cara menambahkan nilai L (induktansi) ke dalam saluran transmisi, sehingga Z_c akan menjadi lebih besar yang pada akhirnya akan memperkecil koefisien pantulan (ρ_R). Penambahan nilai L (induktansi) ke dalam saluran transmisi dilakukan dengan cara memasang reaktor shunt pada ujung pengirim saluran transmisi. Harus diperhatikan di sini bahwa gelombang-gelombang yang berjalan kembali ke arah ujung pengirim akan menyebabkan pantulan-pantulan

baru yang ditentukan oleh koefisien pantulan pada ujung pengirim ρ_S dan impedansi ujung pengirim Z_R .

$$\rho_S = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \quad 2.29$$

dimana:

ρ_S = koefisien pantulan pada ujung pengirim

Z_R = impedansi ujung pengirim

Z_C = impedansi karakteristik (impedansi surja)

Oleh karena itu pemasangan reaktor pada ujung pengirim selain berpengaruh pada nilai impedansi surja (Z_C) juga berpengaruh pada nilai impedansi pengirim (Z_R). Sehingga hubungan antara nilai induktansi reaktor dan tegangan lebih transien yang terjadi tidak akan linear.

2.8 Parameter Saluran

Dalam mempelajari transien pada saluran transmisi tiga fasa yang berkaitan dengan masalah gelombang berjalan, saluran dapat digambarkan sebagai sebuah rangkaian resistansi, induktansi dan kapasitansi. Parameter R , L dan C adalah resistansi, induktansi dan kapasitansi saluran per satuan panjang.

a. Resistansi

Menurut Stevenson (1996), resistansi dari suatu penghantar saluran transmisi adalah penyebab yang terpenting dari rugi-rugi daya pada saluran transmisi tersebut. Jika tidak ada keterangan lain, maka yang dimaksudkan dengan istilah resistansi adalah resistansi efektif. Resistansi efektif dari sebuah penghantar saluran transmisi adalah:

$$R = \frac{P_{out}}{I^2} \quad 2.30$$

Dengan rugi-rugi daya (P_{out}) dinyatakan dalam watt dan I adalah arus rms pada penghantar dalam ampere. Resistansi efektif sebuah penghantar adalah sama dengan resistansi arus searah (DC) dari penghantar tersebut jika terdapat distribusi arus yang merata di seluruh penghantar. Resistansi DC diberikan oleh persamaan sebagai berikut :

$$R_0 = (p \times l) / A \quad 2.31$$

dimana:

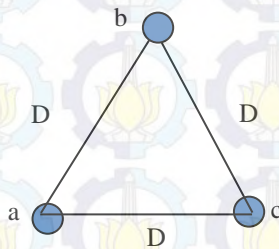
ρ = hambatan jenis penghantar

L = panjang penghantar

A = luas penampang penghantar

b. Induktansi

Suatu penghantar transmisi yang dialiri listrik akan menghasilkan fluks gandeng atau *fluks linkages* persatuan arus saluran sepanjang penghantar tersebut. Bila jarak masing-masing penghantar pada suatu saluran transmisi 3 fasa dengan jarak pemisah yang sama (dengan jarak simetri), maka penghantar-penghantar dari suatu saluran tiga fasa yang terpisah akan membentuk sudut-sudut suatu segitiga sama sisi. Jika kawat netral tidak ada atau bahwa arus-arus fasor tiga-fasa seimbang, maka $I_a + I_b + I_c = 0$.



Gambar 2.10 Penampang penghantar-penghantar yang sama pada suatu saluran tiga fasa

Pada gambar 2.10 dapat diperoleh saluran penghantar tunggal D_{ab} , D_{bc} dan D_{ca} adalah jarak antara pusat-pusat konduktor tunggal fasa dimana dapat disebut GMD (*Geometric Mean Distance*) yang dirumuskan sebagai berikut : [9]

$$D_{eq} = \sqrt[3]{d_{ab} \times d_{bc} \times d_{ca}} \quad 2.32$$

Untuk menentukan fluks gandeng penghantar a, adalah sebagai berikut:

$$\psi_a = 2 \cdot 10^{-7} (I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D}) \quad 2.33$$

$$\begin{aligned} \psi_a &= 2 \cdot 10^{-7} I_a (\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D}) \\ \psi_a &= 2 \cdot 10^{-7} I_a \ln \frac{D}{r'} \end{aligned} \quad 2.34$$

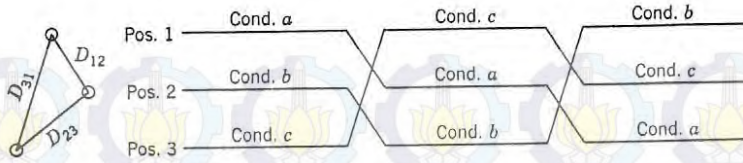
Persamaan (2.33) sama bentuknya dengan persamaan (2.34) untuk saluran fasa tunggal kecuali bahwa r' menggantikan GMR (*Geometric Mean Radius*). Karena simetri, induktansi penghantar b dan c sama dengan induktansi penghantar a. Karena setiap fasa hanya terdiri dari satu penghantar saja sehingga induktansi untuk saluran tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} H/m \quad 2.36$$

Pada persamaan (2.35) nilai r' dapat dikatakan sebagai jari-jari fiktif konduktor berketebalan nol, sehingga tidak mempunyai fluks internal sehingga nilai-nilai GMR biasanya sudah tersedia untuk penghantar-penghantar standart dari tabel ACSR sedangkan nilai D dapat dinyatakan sebagai GMD. Perhitungan induktansi per fasa dari saluran untuk saluran tiga fasa rangkaian tunggal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} H/m \quad 2.36$$

Apabila jarak pemisah penghantar-penghantar suatu saluran tiga fasa tidak sama (tidak simetri) maka akan menghasilkan suatu rangkaian yang tidak seimbang dari induktansi-induktansi yang berbeda pada setiap fasanya. Keseimbangan ketiga fasa dapat dikembalikan dengan mempertukarkan posisi-posisi penghantar pada selang jarak yang teratur di sepanjang saluran sehingga setiap penghantar akan menduduki posisi semula penghantar yang lain pada suatu jarak yang sama. Pertukaran posisi penghantar semacam ini disebut transposisi.



Gambar 2.11 Siklus transposisi

Pada gambar 2.11 dapat dijelaskan bahwa penghantar fasa ditandai dengan a, b, dan c, dan posisi-posisi yang didudukinya diberi nomor 1,2, dan 3. Transposisi menghasilkan induktansi rata-rata yang sama pada masing-masing penghantar untuk seluruh siklus. Pada penghantar a untuk mendapatkan rumus fasor fluks gandeng a pada posisi 1 jika b berada pada posisi 2 dan c pada posisi 3, sebagai berikut:

$$\psi_{a1} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{31}} \right) \quad 2.37$$

$$a \rightarrow 2, b \rightarrow 3 \text{ \& c} \rightarrow 1$$

$$\psi_{a2} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right)$$

$$a \rightarrow 3, b \rightarrow 1 \text{ \& c} \rightarrow 2$$

$$\psi_{a3} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \quad 2.38$$

$$\Rightarrow \psi_a = \frac{1}{3} (\psi_{a1} + \psi_{a2} + \psi_{a3})$$

$$\psi_a = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} \left(3 I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right)$$

Dengan pembatasan bahwa $I_a = - (I_b + I_c)$,

$$\psi_a = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} I_a \left(3 \ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) \quad 2.39$$

$$\psi_a = 2 \cdot 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt{D_{12} D_{23} D_{31}}}{r'} \quad 2.40$$

Sehingga induktansi rata-rata per fasa sama dengan induktansi saluran tiga fasa dengan jarak simetri. Untuk nilai GMD dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$GMD = \sqrt[3]{d_{12} \times d_{23} \times d_{31}} \quad 2.41$$

Untuk dapat dijelaskan bahwa GMR (*Geometric Mean Radius*) merupakan jari-jari fiktif konduktor berketebalan nol, sehingga tidak mempunyai fluks internal, sedangkan GMD (*Geometric Mean Distance*) merupakan suatu nilai yang menggantikan konfigurasi asli konduktor-konduktor dengan sebuah jarak rata-rata hipotesis sehingga induktansi bersama dari konfigurasi tersebut tetap sama. Untuk penghantar-penghantar berkas, GMR penghantar berkas dapat dinyatakan dalam D_s^b , sedangkan GMR masing-masing penghantar yang membentuk berkas dapat dinyatakan D_s (dapat diketahui dari tabel dengan jenis penghantar yang digunakan) perhitungan GMR berkas sebagai berikut:

Untuk berkas dua penghantar :

$$D_s^b = \sqrt[4]{(D_s \times d)^2} = D_s^b = \sqrt{D_s \times d} \quad 2.42$$

Untuk berkas tiga penghantar :

$$D_s^b = \sqrt[9]{(D_s \times d \times d \times d)^3} = D_s^b = \sqrt[3]{D_s \times d^2} \quad 2.43$$

Untuk berkas empat penghantar :

$$D_s^b = \sqrt[16]{(D_s \times d \times d \times d \times d \times 2^{1/2})^4}$$

$$D_s^b = 1,09 \sqrt[4]{D_s \times d^3} \quad 2.44$$

Reaktansi induktif dalam ohm-km pada 60 Hz didapat dengan mengalikan induktansi dalam henry per meter dengan adalah $1/2 \pi f c$ dimana C dinyatakan dalam farad/meter. Jadi pada 60 Hz adalah $2 \pi 60 \times 1000$:

$$X_L = 0,0754 \times \ln \frac{GMD}{GMR} \text{ ohm/km} \quad 2.45$$

c. Kapasitansi

Suatu penghantar pada saluran transmisi mempunyai beda potensial antara penghantar yang satu dengan penghantar yang lainnya. Akibat

dari beda potensial tersebut, maka penghantar-penghantar tersebut akan bersifat seperti kapasitor, yaitu apabila dua buah penghantar yang mempunyai beda potensial dan dipisahkan oleh suatu ruang bebas atau beban dielektrik, maka akan menghasilkan muatan kapasitif di antara kedua penghantar tersebut. Besar kapasitansi antar penghantar:

$$C = \frac{\pi \cdot k}{\ln \frac{D}{r}} \text{ F/m} \quad 2.46$$

Jika kapasitansi antar saluran dianggap terdiri dari dua kapasitansi yang sama dalam hubungan seri, maka tegangan antara saluran terbagi dua sama besar diantara kedua kapasitansi tersebut dan titik hubung antara keduanya berada pada potensial tanah. Jadi kapasitansi ke netral adalah satu dari dua kapasitansi seri yang sama atau dua kali kapasitansi antar saluran adalah :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\ln \frac{GMD}{GMR}} \text{ F/m} \quad 2.47$$

Jari-jari dalam persamaan (2.46) untuk kapasitansi adalah jari-jari luar yang sebenarnya dari penghantar (jari-jari luar r penghantar suatu saluran yang terdiri dari satu penghantar untuk setiap fasa) dan perhitungan GMR penghantar bukan seperti pada rumus induktansi.

Untuk saluran atas tiang, k adalah $8,855 \cdot 10^{-12}$ karena K_r untuk udara adalah 1,0. Reaktansi kapasitif dalam ohm-meter adalah $1/2 \pi f c$ dimana C dinyatakan dalam farad/meter. Jadi Pada 60 Hz reaktansi kapasitif:

$$X_c = 4,77 \times 10^4 \frac{GMD}{GMR} \text{ ohm/km} \quad 2.48$$

2.9 Surja Arrester

Surja arrester adalah alat yang dipakai untuk melindungi peralatan tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Berhubung dengan fungsinya, arester dapat menahan tegangan sistem 50 c/s untuk waktu tak terbatas dan harus dapat melakukan surja arus dengan tidak merusaknya, kecuali memiliki *protective ratio* yang tinggi yaitu perbandingan antara tegangan surja maksimum yang diperbolehkan pada waktu pelepasan dan tegangan sistem 50 c/s maksimum yang dapat ditahan sesudah pelepasan (*discharge*) yang terjadi. Surja arrester tidak

melakukan apapun saat tegangan beroperasi normal. Saat tegangan berlebih surja arrester akan mengendalikan arus (tanpa menyebabkan *fault*). Dengan demikian, surja arrester harus memiliki resistansi yang luar biasa tinggi selama operasi sistem berjalan normal dan secara relatif resistansi kecil saat terjadi *transient overvoltage*. *Lightning arrester* adalah suatu alat pengaman yang melindungi jaringan dan peralatannya terhadap tegangan lebih abnormal yang terjadi karena sambaran petir (*flash over*) dan karena surja hubung (*switching surge*) di suatu jaringan. *Lightning arrester* ini memberi kesempatan yang lebih besar terhadap tegangan lebih abnormal untuk dilewatkan ke tanah sebelum alat pengaman ini merusak peralatan jaringan seperti transformator dan isolator. Oleh karena itu *lightning arrester* merupakan alat yang peka terhadap tegangan, maka pemakaiannya harus disesuaikan dengan tegangan sistem.

Arrester harus dapat menahan tegangan sistem 50 Hz untuk waktu yang terbatas dan harus dapat melewatkan surja arus ke tanah tanpa mengalami kerusakan. Arrester berlaku sebagai jalan pintas sekitar isolasi. Arrester membentuk jalan yang mudah untuk dilalui oleh arus kilat atau petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Arrester juga merupakan kunci dalam koordinasi isolasi suatu sistem tenaga listrik. Bila surja datang ke gardu induk arrester bekerja melepaskan muatan listrik serta mengurangi tegangan abnormal yang akan mengenai peralatan dalam gardu induk. Persyaratan yang harus dipenuhi oleh arrester adalah sebagai berikut :

- a. Tegangan percikan (*sparkover voltage*) dan tegangan pelepasannya (*discharge voltage*), yaitu tegangan pada terminalnya pada waktu pelepasan, harus cukup rendah, sehingga dapat mengamankan isolasi peralatan. Tegangan percikan disebut juga tegangan gagal sela (*gap breakdown voltage*) sedangkan tegangan pelepasan disebut juga tegangan sisa (*residual voltage*) atau jatuh tegangan (*voltage drop*). Tegangan jatuh pada arrester = $I \times R$. Dengan I adalah arus arrester maksimum (A) dan R (Ohm) tahanan arrester.
- b. Arrester harus mampu memutuskan arus dinamik dan dapat bekerja terus seperti semula. Batas dari tegangan sistem di mana arus susulan ini masih mungkin, disebut tegangan dasar (*rated voltage*) dari arrester.

Pada prinsipnya arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Pada kondisi normal arrester berlaku sebagai isolasi tetapi bila timbul surja arrester berlaku sebagai konduktor yang berfungsi melewatkan aliran arus yang tinggi ke tanah. Setelah arus hilang, arrester harus dengan cepat kembali menjadi isolator. Pada dasar arrester terdiri dari dua bagian yaitu : Sela api (*spark gap*) dan *valve resistor*, keduanya dihubungkan secara seri. Batas atas dan bawah dari tegangan percikan ditentukan oleh tegangan sistem maksimum dan oleh tingkat isolasi peralatan yang dilindungi. Untuk penggunaan yang lebih khusus arrester mempunyai satu bagian lagi yang disebut dengan Tahanan katup dan sistem pengaturan atau pembagian tegangan (*grading system*). Jika hanya melindungi isolasi terhadap bahaya kerusakan karena gangguan dengan tidak memperdulikan akibatnya terhadap pelayanan, maka cukup dipakai sela batang yang memungkinkan terjadinya percikan pada waktu tegangan mencapai keadaan bahaya. Dalam hal ini, tegangan sistem bolak-balik akan tetap mempertahankan busur api sampai pemutus bebannya dibuka. Dengan menyambung sela api ini dengan sebuah tahanan, maka kemungkinan api dapat dipadamkan. Tetapi bila tahanannya mempunyai harga tetap, maka jatuh tegangannya menjadi besar sekali sehingga maksud untuk meniadakan tegangan lebih tidak terlaksana, dengan akibat bahwa maksud melindungi isolasi pun gagal. Oleh sebab itu disarankan memakai *valve resistor*, yang mempunyai sifat khusus, yaitu tahanannya kecil sekali bila tegangannya dan arusnya besar. Proses pengecilan tahanan berlangsung cepat yaitu selama tegangan lebih mencapai harga puncak. Tegangan lebih dalam hal ini mengakibatkan penurunan drastis pada tahanan sehingga jatuh tegangannya dibatasi meskipun arusnya besar. Bila tegangan lebih habis dan tinggal tegangan normal, tahanannya naik lagi sehingga arus susulannya dibatasi kira – kira 50 ampere. Arus susulan ini akhirnya dimatikan oleh sela api pada waktu tegangan sistemnya mencapai titik nol yang pertama sehingga alat ini bertindak sebagai sebuah kran yang menutup arus, dari sini didapatkan nama *valve resistor* [2].

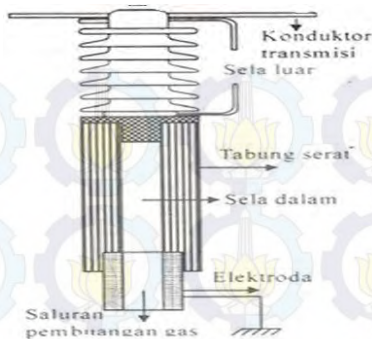
Pada arrester modern pemadaman arus susulan yang cukup besar (200–300 Ampere) dilakukan dengan bantuan medan magnet. Dalam hal ini, baik amplitud maupun lamanya arus susulan dapat dikurangi dan pemadaman dapat dilakukan sebelum tegangan sistem

mencapai harga nol. Tegangan dasar (*rated voltage*) yang dipakai pada *lightning arrester* adalah tegangan maksimum sistem, dimana *lightning arrester* ini harus mempunyai tegangan dasar maksimum tak melebihi tegangan dasar maksimum dari sistem, yang disebut dengan tegangan dasar penuh atau *lightning arrester* 100 %. Ada dua jenis arester yang umum dipakai, yaitu arester jenis ekspulsi dan jenis katup. [5]

2.9.1 Arrester Ekspulsi atau Tabung Pelindung

Pada prinsipnya terdiri dari sela percik yang berada dalam tabung serat dan sela percik yang berada diluar diudara atau disebut juga sela seri lihat pada gambar. Bila ada tegangan surja yang tinggi sampai pada jepitan arrester kedua sela percik, yang diluar dan yang berada didalam tabung serat, tembus seketika dan membentuk jalan penghantar dalam bentuk busur api. Jadi arrester menjadi konduktor dengan impedansi rendah dan melalukan surja arus dan arus daya system bersama-sama. Panas yang timbul karena mengalirnya arus petir menguapkan sedikit bahan tabung serat, sehingga gas yang ditimbulkannya menyembur pada api dan mematikannya pada waktu arus susulan melewati titik nolnya.

Arus susulan dalam arrester jenis ini dapat mencapai harga yang tinggi sekali tetapi lamanya tidak lebih dari satu atau dua gelombang, dan biasanya kurang dari setengah gelombang. Jadi tidak menimbulkan gangguan. Arrester jenis ekspulsi ini mempunyai karakteristik volt-waktu yang lebih baik dari sela batang dan dapat memutuskan arus susulan. Tetapi tegangan percik impulsnya lebih tinggi dari arrester jenis katup sedangkan kemampuan untuk memutuskan arus susulan tergantung dari tingkat arus hubung singkat dari sistem pada titik dimana arrester itu dipasang. Dengan demikian perlindungan dengan arrester jenis ini dipandang tidak memadai untuk perlindungan transformator daya, kecuali untuk system distribusi. Arrester jenis ini banyak juga digunakan pada saluran transmisi untuk membatasi besar surja yang memasuki gardu induk. Dalam penggunaan yang terakhir ini arrester jenis ini sering disebut sebagai tabung pelindung.



Gambar 2.12 Arrester jenis ekspulsi

Arrester jenis ini mampu melindungi trafo distribusi dengan rating tegangan 3-15kV, tetapi belum mampu melindungi trafo daya yang memiliki rating daya lebih besar. Arrester jenis ekspulsi ini dapat juga dipasang pada saluran transmisi hantaran udara untuk mengurangi gangguan surja petir yang masuk ke gardu induk.

2.9.2 Arrester Katup

Arrester jenis katup ini terdiri dari sela percik terbagi atau sela seri yang terhubung dengan elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tidak linier. Tegangan frekuensi dasar tidak dapat menimbulkan tembus pada sela seri. Apabila sela seri tembus pada saat tibanya suatu surja yang cukup tinggi, alat tersebut menjadi penghantar. Sela seri itu tidak bisa memutuskan arus susulan. Dalam hal ini dibantu oleh tahanan tak linier yang mempunyai karakteristik tahanan kecil untuk arus besar dan tahanan besar untuk arus susulan dari frekuensi dasar terlihat pada karakteristik volt-ampere. Arrester jenis katup ini dibagi menjadi dalam empat jenis yaitu [7] :

- Arrester katup jenis gardu
Arrester jenis gardu ini adalah jenis yang paling efisien dan juga paling mahal. Perkataan gardu disini berhubungan dengan pemakaiannya secara umum pada gardu induksi besar. Umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian-rangkaian mulai dari 2400 volt sampai 287 kV dan lebih tinggi.

- Arrester katup jenis saluran

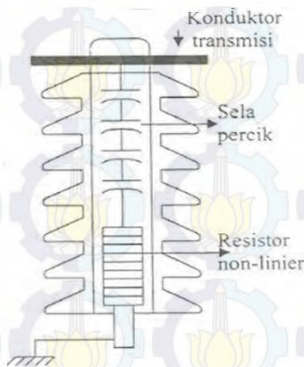
Arrester katup jenis saluran ini lebih murah dari arrester jenis gardu. Kata saluran disini bukanlah berarti untuk saluran transmisi. Seperti arrester jenis gardu, arrester jenis saluran ini dipakai untuk melindungi transformator dan pemutus daya serta dipakai pada sistem tegangan 15 kV sampai 69 kV.

- Arrester katup jenis gardu untuk mesin-mesin

Arrester jenis gardu ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar. Pemakaiannya untuk tegangan 2,4 kV sampai 15 kV.

- Arrester katup jenis distribusi untuk mesin-mesin

Arrester jenis distribusi ini khusus melindungi mesin-mesin berputar seperti diatas dan juga melindungi transformator dengan pendingin udara tanpa minyak. Arrester jenis ini dipakai pada peralatan dengan tegangan 120V sampai 750V.



Gambar 2.13 Arrester jenis katup

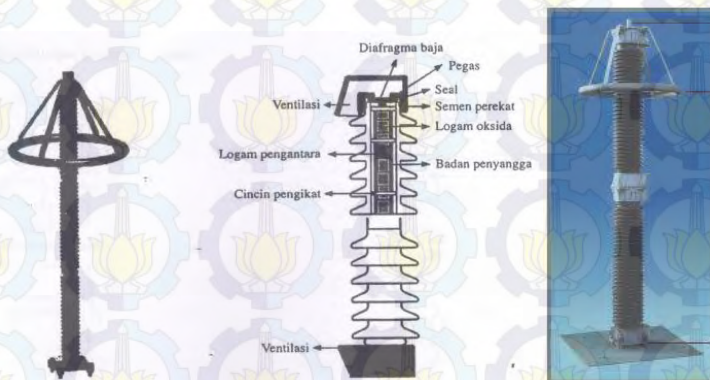
Dalam tugas akhir ini arrester yang dipakai dalam permodelan saluran transmisi 150 kV adalah arrester katup tanpa sela percik yaitu logam oksida (*Metal-Oxide/MOV*).

Logam oksida arrester dikembangkan setelah penerapan silikon karbida arrester katup untuk sistem *electric power*. Komponen utama dari arester yang membedakan arrester oksida logam dari arrester sebelumnya adalah katup oksida seng yang telah secara signifikan lebih besar karakteristik *non-linear* tegangan (volt) - arus (A) dibandingkan

dengan perangkat sebelumnya. Katup oksida seng beroperasi lebih dekat dengan yang dari dioda azener yang diterapkan dalam industri elektronik. Katup ini mampu diterapkan tanpa adanya gaps dalam desain, menghilangkan karakteristik arrestersparkover dari sebelumnya. Katup oksida seng biasanya menyediakan tegangan discharge lebih rendah daripada desain yang tersedia sebelumnya.

Komponen utama *metal Oxide Arrester* terbuat dari bahan Zinc Oxide (ZnO), kemudian lebih dikenal dengan sebutan *metal oxide surge arrester* (MOA). Pada dasarnya arrester ini sama dengan arrester pendahulunya, hanya saja arrester ini tidak mempunyai komponen sel gap. Prinsip kerja *metal oxide arrester*, pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan arrester jenis katup. Karena arrester MOA ini tidak memiliki tahanan sela seri, maka arrester ini sangat bergantung pada tahanan yang ada dalam arrester itu sendiri. Apabila terkena petir, tahanan arrester akan langsung turun sehingga menjadi konduktor dan mengalirkan petir ke bumi. Namun, setelah petir lewat, tahanan kembali naik dan bersifat isolator.

Keunggulan dari MOA adalah memiliki reaksi yang cepat dalam membumikan petir. Hal ini disebabkan arrester ini tidak memiliki sela seri. Sedangkan kekurangannya adalah akibat ketergantungan dengan tahanan yang ada di dalam isolator dan bekerja karena pengaruh termal, maka arrester ini harus memperhitungkan pengaruh termalnya.



Gambar 2.14 Konstruksi dan bentuk fisis arrester MOV

2.9.3 Karakteristik Arrester

Karakteristik yang harus dipenuhi oleh arester agar dapat bekerja secara optimal yaitu: [7]

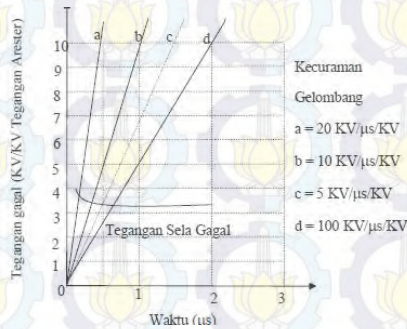
- Tegangan rated 50 c/s yang tidak boleh dilampaui
- Mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage limiting*) bila dilalui oleh berbagai macam arus petir.

Sebagaimana diketahui bahwa arrester adalah suatu peralatan tegangan yang mempunyai tegangan ratingnya sehingga arrester tidak boleh dikenakan tegangan yang melebihi rating ini, baik pada keadaan normal maupun dalam keadaan abnormal. Arrester menanggung tegangan sistem normal dan tegangan lebih transient 50 c/s. Karakteristik pembatasan tegangan impuls dari arrester adalah harga yang dapat ditahan oleh terminal ketika melakukan arus-arus tertentu dan harga ini berubah dengan singkat baik sebelum arus mengalir maupun mulai bekerja. Batas termis ialah kemampuan untuk mengalirkan arus surja dalam waktu yang lama atau terjadi berulang-ulang tanpa menaikkan suhunya. Meskipun kemampuan arrester untuk menyalurkan arus sudah mencapai 65000-100.000 ampere tetapi kemampuannya untuk melakukan surja hubung terutama bila saluran menjadi panjang dan berisi tenaga besar masih rendah. Maka agar supaya tekanan stress pada isolasi dapat dibuat serendah mungkin, suatu sistem perlindungan tegangan lebih perlu memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- Dapat melepas tegangan lebih ke tanah tanpa menyebabkan hubung singkat ke tanah (*saturated ground fault*)
- Dapat memutuskan arus susulan.
- Mempunyai tingkat perlindungan (*protection level*) yang rendah, artinya tegangan percikan sela dan tegangan pelepasannya rendah.

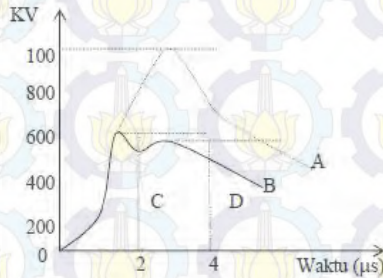
Tegangan gagal sela merupakan tegangan percikan, pada frekwensi sistem 50 c/s harus mempunyai harga yang tinggi untuk mengurangi seminimum mungkin pelepasan yang disebabkan oleh adanya hubung singkat ke tanah dan surja hubung. Tegangan pelepasan, disebut juga tegangan sisa (*residual*) atau jatuh tegangan IR, adalah tegangan antara terminal-terminal arester jika ia sedang melakukan arus surja. Kegagalan sela yang dipengaruhi oleh kecuraman tegangan yang

datang menentukan tegangan pelepasan permulaan pada arester. Jatuh tegangan pada elemen kran, yang tergantung pada kecuraman dan besarnya surja arus, menentukan tegangan arester pada waktu pelepasan[9].



Gambar 2.15 Kecuraman gelombang

Besarnya pengaruh arester terhadap sebuah surja tegangan lebih dinyatakan dalam gambar berikut, dimana efisiensi dari perlindungan ditentukan terutama oleh tegangan pelepasan (D), tegangan percikan (C) yang untuk tegangan impuls curam mungkin lebih tinggi dari tegangan sisa kurang penting artinya oleh karena waktunya yang sangat singkat sebelum kegagalan terjadi.



Gambar 2.16 Pengaruh arrester terhadap surja

dimana:

- A = gelombang surja di gardu induk tanpa arester
- B = gelombang surja di gardu induk dengan arester
- C = tegangan percikan pada muka
- D = tegangan pelepasan (sisa)

Berdasarkan arus pelepasan nominalnya, arrester dibagi menjadi empat kelas yaitu:

- Kelas arus 10 kA digunakan untuk perlindungan GI yang besar dengan frekuensi sambaran petir yang cukup tinggi dengan tegangan sistem diatas 70 kV.
- Kelas arus 5 kA digunakan untuk perlindungan GI yang besar dengan frekuensi sambaran petir yang cukup tinggi dengan tegangan sistem diatas 70 kV.
- Kelas arus 2.5 kA digunakan untuk perlindungan GI yang kecil dengan tegangan sistem dibawah 22 kV.
- Kelas arus 1.5 kA digunakan untuk melindungi trafo kecil.

Tabel 2.2 Pelepasan arus arrester

Kelas Arrester	Harga Puncak Arus Surja
10 kA tugas berat	100 kA
10 kA tugas ringan	100 kA
5 kA	65 kA
2.5 kA	25 kA
1.5 kA	10 kA

2.10 Pertimbangan Pemilihan Arrester

Setiap peralatan di GI harus memiliki *Standart lightning Impulse With-Stand* (lebih dikenal BIL) sesuai desain. Dalam memilih arrester yang sesuai untuk keperluan tertentu, beberapa faktor harus diperhatikan, yaitu: [2]

- Kebutuhan perlindungan: berhubungan dengan kekuatan isolasi dari alat-alat yang harus dilindungi dan karakteristik impuls arrester.
- Tegangan sistem: tegangan maksimum yang mungkin timbul pada jepitan arrester.
- Arus hubung singkat sistem: hanya diperlukan pada arrester jenis ekspulsi.

- Jenis arrester: apakah jenis gardu, jenis saluran atau jenis distribusi.
- Faktor kondisi luar: apakah normal atau tidak normal (2.000 meter atau lebih di atas permukaan laut), temperatur, dan kelembapan yang tinggi serta pengotoran.
- Faktor ekonomi: perbandingan antara ongkos pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada arrester atau bila dipasang arrester yang lebih rendah mutunya.

2.11 Tegangan Sistem

Tegangan sistem adalah tegangan tertinggi yang mungkin timbul pada kawat. Tegangan sistem maksimum kawat ke tanah biasanya diambil 110 persen dari tegangan jala-jala. Tegangan sistem terbagi atas: [3]

2.11.1 Sistem yang Tidak Diketanahkan atau Sistem Terisolasi

Pada sistem tidak diketanahkan atau terisolasi, tegangan yang mungkin timbul pada arrester dapat lebih besar dari tegangan jala-jala. Tegangan maksimum untuk pemakaian arrester, diambil 110% dari tegangan jala-jala. Arrester dengan tegangan ini dinamakan arrester 100%.

2.11.2 Sistem Diketanahkan dengan Kumpanan Petersen.

Tegangan maksimum pada gangguan tanah sama dengan tegangan jala-jala. Untuk sistem ini disarankan menggunakan arrester dengan tegangan jala-jala atau arrester 100%.

2.11.3 Sistem Diketanahkan dengan Impedansi

Sistem yang diketanahkan dengan Impedansi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu diketanahkan secara efektif dan tidak efektif. Sistem yang diketanahkan efektif yaitu apabila pada keadaan gangguan tegangan kawat ketanah tidak melampaui 80 % dari tegangan jala-jala sistem. Hal ini dapat tercapai apabila $R_o/X_1 \leq 1$ dan $X_o/X_1 < 3$. Jadi, apabila pada suatu sistem tenaga listrik yang menggunakan tegangan 150 kV dan sistem pengetanahan efektif, maka rating arrester yang bisa dipasang adalah $0.8 \times 1.1 \times 150 \text{ kV} = 132 \text{ kV}$. Sedangkan Sistem yang diketanahkan tidak efektif adalah bila tegangan pada fase sehat dalam keadaan gangguan kawat tanah lebih besar dari 80 % tegangan jala-jala tetapi tidak melebihi 100 %. Rating arrester yang dipasang tergantung pada hargaharga R_o/X_1 dan X_o/X_1 . Tegangan maksimum kawat ke

tanah untuk suatu sistem yang diketanahkan tidak efektif dapat dicari dengan menggunakan grafik. Pada umumnya arrester dibagi dalam 3 macam angka rating yaitu 100 %, 80% dan 75 %. Untuk tegangan arrester yang lebih rendah dari 75 % harus ditambahkan 7.5 % sebagai faktor keselamatan.

2.12 Rating Arrester

Pada beberapa tabung pelindung atau arrester jenis ekspulsi perlu juga diketahui rating arusnya untuk mengetahui kapasitas termalnya. Hal yang perlu diketahui dari sebuah arrester adalah tegangan nominal arrester (*nominal voltage arrester*). Tegangan nominal (*nominal voltage arrester*) adalah tegangan di mana penangkap petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. [4]

Penangkap petir tidak dapat bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih tetap mampu memutuskan arus susulan dari sistem secara efektif. Penangkap petir umumnya tidak dapat bekerja jika ada gangguan fasa ke tanah di satu tempat dalam sistem, oleh karena itu rating tegangan penangkap petir harus lebih tinggi dari tegangan fasa sehat ke tanah. Untuk mengetahui tegangan maksimum yang mungkin terjadi pada fasa yang sehat ke tanah sebagai akibat gangguan satu fasa ke tanah perlu diketahui: tegangan sistem tertinggi (*system highest voltage*), umumnya diambil harga 110 % dari harga tegangan nominal sistem dan koefisien pentanahan yang didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan rms fasa sehat ke tanah dalam keadaan gangguan pada tempat di mana penangkap petir dipasang, dengan tegangan rms fasa tertinggi dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan. Jadi tegangan pengenalan dari suatu penangkap petir (*arrester rating*) adalah: [4]

$U_1 = \text{Tegangan rms ke fasa tertinggi} \times \text{koefisien pentanahan}$

$U_2 = \text{Tegangan rms fasa ke fasa} \times 1,10 \times \text{koefisien pentanahan}$

Sistem yang ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 0,8. Penangkap petirnya disebut sebagai penangkap petir 80 % sedangkan sistem yang tidak ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 1,0. Penangkap petirnya disebut sebagai penangkap 100 %.

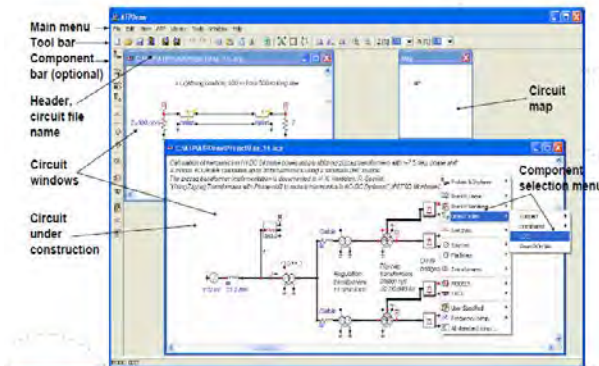


BAB 3

PEMODELAN SALURAN TRANSMISI 150 KV

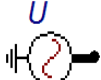

3.1 Permodelan Menggunakan ATP/EMTP

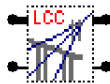
ATP Draw merupakan sebuah preprosesor versi ATP dari *Electromagnetic Transient Program* (EMTP) pada sistem operasi windows. Dalam simulasi kali ini menggunakan fasilitas ATP Draw dari software EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) untuk memodelkan dan mensimulasikan pengaruh lokasi pemasangan surja arrester pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV di Gardu Induk (GI) Waru. ATP Draw adalah program grafis untuk versi ATP dari EMTP untuk windows. ATP termasuk salah satu program yang digunakan secara luas untuk simulasi digital dari fenomena transien elektromagnetik. Gambar 3.1 menunjukkan tampilan utama simulasi menggunakan *software ATP Draw*.



Gambar 3.1 Tampilan utama ATP draw.

Komponen-komponen yang digunakan dalam permodelan saluran transmisi 150 kV yaitu:

-  : Sumber Generator 3 Fasa
-  : Switching Impuls atau Circuit Breaker



: Menara Transmisi



: Beban RLC

U



: Arrester MOV

Pemodelan menggunakan saluran udara tiga fasa dengan panjang masing-masing LCC yaitu 300 meter. Pemodelan dipilih menggunakan tipe JMarti. Pemodelan sesuai dengan data pendekatan pada GI Waru 150 kV. Pemodelan saluran transmisi dengan menggunakan komponen LCC (*Line Constant*) ditunjukkan pada lampiran D.

3.2 Model Saluran Transmisi 150 kV

Saluran transmisi yang dipakai untuk dimodelkan adalah saluran transmisi 150 kV pada Gardu Induk (GI) Waru dengan jurusan Waru-Karangpilang dimana terdapat 28 menara transmisi. Untuk melakukan perhitungan dan analisa maka diperlukan data-data yang menunjang. Pada tabel 3.1 menunjukkan data transmisi SUTT 150 kV. Tabel 3.2 menunjukkan data spesifikasi desain dari menara 150 kV yang digunakan untuk mengetahui spesifikasi dari menara yang digunakan sebagai parameter perhitungan. Tabel 3.3 digunakan untuk mengetahui struktur menara SUTT 150 kV. [10]

Tabel 3.1 Data transmisi SUTT 150 kV

Gardu induk – Jurusan	Transmisi Terpasang				
	Teg (kV)	Route (m)	Jenis	MM2/ MCM	Nom. (Amp)
Waru - Karangpilang I	150	10740	ACSR	2 x 340	1480
Waru - Karangpilang II	150	10740	ACSR	2 x 340	1480

Sumber: PT. PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali UPT Surabaya

Tabel 3.2 Data spesifikasi menara transmisi 150 kV

Tinggi Menara	37,7 m
Tinggi Kawat Tanah	37,7 m
Jumlah Kawat Tanah	2 buah
Voltage	150 KV
Number Of Circuit	2
Horizotal Angle	$0^0 - 3^0$
Loading Span	Besaran (m)
Bask Span	300 m
Weight Span	Normal : 700 m
	Broken : 400 m
Wind Span	Normal : 500 m
	Broken : 400 m
Power Conductor	Besaran (m)
Kind and Size	ACSR 340 mm ²
Diameter	25 mm
Weight	1,18 Kg/m
R DC 20°	0,0851 Ohm/Km
Ground Wire	Besaran (m)
Kind and Size	AW 55 mm ²
Diameter	9,6 mm
Weight	0,44 Kg
Max Working Tension	1,5 Kg
Wind Pressure	Besaran (m)
Menara	120 Kg/m ²
Wire (Cont and GW)	40 Kg/m ²
Insulator String	60 Kg / 2 String

Sumber: PT. PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali UPT Surabaya

Tabel 3.3 Data struktur menara transmisi 150 kV

Parameter Menara	Besaran (m)
Panjang Lengan Menara	
Panjang Lengan Menara I	7 m
Panjang Lengan Menara II	7 m
Panjang Lengan Menara III	7 m
Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A	2,1 m
Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A'	2,1 m
Panjang Lengan Menara Kawat Tanah A, A'	2,6 m
Panjang Lengan Menara Kawat Tanah B, B'	2,6 m
Panjang Lengan Menara Kawat Tanah C, C'	2,6 m
Jarak Puncak Menara Ke Konduktor	
Lengan Menara I	4 m
Lengan Menara II	8,1 m
Lengan Menara III	12,2 m
Jarak Konduktor Terhadap Tanah	
Tinggi Kawat Konduktor A	33,7 m
Tinggi Kawat Konduktor B	29,6 m
Tinggi Kawat Konduktor C	25,5 m
Tinggi Kawat Konduktor A'	25,5 m
Tinggi Kawat Konduktor B'	29,6 m
Tinggi Kawat Konduktor C'	33,7 m
Sudut Perlindungan	15 ⁰

Sumber: PT. PLN (Persero) P3B Region Jawa Timur dan Bali UPT Surabaya

Untuk dapat lebih jelas mengenai gambaran menara SUTT 150kV, maka dapat dimodelkan pada kondisi sebenarnya dari SUTT digunakan jenis menara pada lampiran A.

3.3 Koordinasi Lokasi Penempatan Arrester dengan Isolasi Peralatan yang dilindungi

Dalam mengatasi bahaya tegangan lebih surja petir maupun surja hubung terhadap peralatan saluran transmisi, penambahan tingkat isolasi dan penggunaan alat proteksi diterapkan. Penyesuaian tingkat isolasi secara harus diperhitungkan secara menyeluruh dengan mengingat performa proteksi dari arrester. Oleh sebab itu suatu koordinasi isolasi yang didefinisikan sebagai berikut : [4]

- Korelasi antara daya isolasi alat-alat dan rangkaian listrik dengan karakteristik alat-alat pelindungnya sehingga isolasi terlindungi dari bahaya tegangan lebih secara ekonomi.
- Secara keseluruhan isolasi peralatan harus dikoordinasikan sedemikian rupa sehingga apabila tegangan *flashover* yang akan terjadi, langsung dilewatkan *arcing horn*.

Prinsip koordinasi adalah bahwa tingkat isolasi saluran transmisi harus disesuaikan dengan tegangan sistem, isolasi peralatan, dan karakteristik peralatan proteksinya. Sehingga apabila terjadi kegagalan isolasi hanya terbatas pada tempat yang aman dan menimbulkan kerusakan yang kecil serta biaya perbaikannya kecil. Tegangan sistem terbagi menjadi tiga yaitu :

- Tegangan nominal: tegangan yang membedakan satu sistem dengan sistem yang lain.
- Tegangan dasar: tegangan perencanaan dimana alat tersebut digunakan secara kontinyu.
- Tegangan maksimum : tegangan yang dapat ditahan oleh alat yang bersangkutan dan dimana arrester terpasang.

Ada dua unsur utama yang penting yaitu karakteristik tegangan waktu dari isolasi yang harus dilindungi dan karakteristik pelindung dari arrester adalah,

- BIL (*Basic Insulation Level*)

Berdasarkan kesepakatan comites bersama AIEE-IEC-NEMA BIL didefinisikan bahwa suatu referensi level yang dinyatakan dalam tegangan puncak impuls dengan standart bentuk gelombang dari 1,2 x

50 μ s, sehingga isolasi dari peralatan-peralatan listrik mempunyai karakteristik ketahanan impuls sama atau lebih tinggi dari BIL tersebut.

Suatu isolasi harus disesuaikan dengan tingkat ketahanan impuls dengan magnitude tidak kurang dari BIL. Pemilihan dan penentuan BIL (lampiran C) haruslah disesuaikan dengan faktor tegangan arrester dan performanya, penempatan arrester, ketahanan impuls peralatan serta margin yang diperlukan.

- SIL (*Switching Insulation Level*)

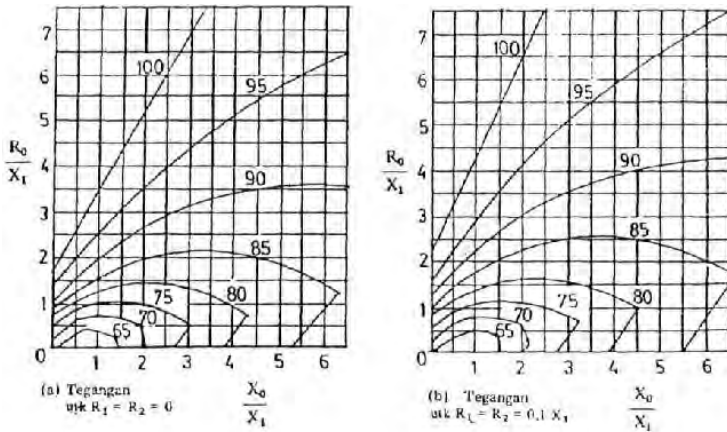
Tingkat ketahanan terhadap surja hubung disebut SIL yang didefinisikan bahwa suatu referensi level yang dinyatakan dalam tegangan puncak surja hubung. Standart bentuk gelombang 250 x 2500 μ s, sehingga isolasi dari peralatan-peralatan listrik mempunyai karakteristik ketahanan surja hubung sama atau lebih SIL tersebut.

3.4 Pemilihan dan Lokasi Penempatan Arrester [2]

Dalam penerapan arrester biasanya diberikan kelebihan tegangan (5-10%) dari keadaan normal. Misalnya arrester yang mempunyai tegangan dasar 105 % dari tegangan kawat normal dipakai apabila tegangan kawat ke tanah dalam keadaan hubung singkat akan menamai tegangan kawat (V_{LL}). Demikian pula, untuk sistem yang dibumikan penuh dimana tegangan kawat ke tanah (V_{LG}) tidak akan melebihi 80 % V_{LL} , tegangan dasar arresternya adalah : $1.05 \times 80 \% =$

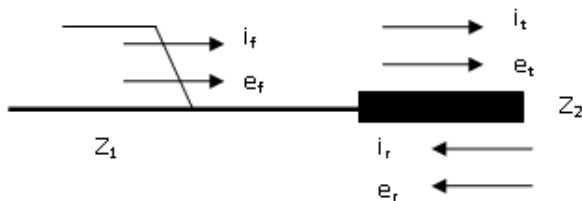
84 % V_{LL} . Bila $\frac{X_0}{X_1} = 1$ tegangan kawat V_{LG} kurang dari 80 % V_{LL}

sehingga arrester dengan tegangan dasar kurang dari 84 % dapat dipakai. Arrester 84 % dapat dipakai dengan aman untuk konstanta di mana jangkauannya ada dalam wilayah 80 % seperti gambar 3.2 asalkan tingkat isolasi impuls dari peralatan dilindungi.



Gambar 3.2 Jangkauan arrester 80 %

Arrester ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi. Tetapi untuk memperoleh kawasan perlindungan yang lebih baik, maka arrester ditempatkan dengan jarak tertentu dari peralatan yang dilindungi. Jarak arrester dengan peralatan yang dilindungi berpengaruh pada besarnya tegangan yang tiba pada peralatan. Jika jarak arrester terlalu jauh maka tegangan yang tiba pada peralatan melebihi tegangan yang dapat dipikulnya. Hal ini dapat dijelaskan dengan konsep gelombang berjalan berikut ini :



Gambar 3.3 Gelombang berjalan dan pantulannya

Keterangan:

e_f = Gelombang tegangan yang datang

i_f = Gelombang arus yang datang

- e_r = Gelombang tegangan yang dipantulkan
 i_r = Gelombang arus yang dipantulkan
 e_t = Gelombang tegangan yang diteruskan
 i_t = Gelombang arus yang diteruskan

Pada Gambar 3.3 ditunjukkan suatu gelombang tegangan merambat pada suatu jaringan yang impedansi surjanya Z_1 menuju suatu jaringan yang impedansi surjanya Z_2 . Titik T adalah titik persambungan antara kedua jaringan. Tegangan pada titik T dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$e_t = e_f + e_r \quad 3.1$$

Karena arus yang dipantulkan berpolaritas negative, maka arus pada titik T adalah sebagai berikut:

$$i_t = i_f - i_r \quad 3.2$$

Menurut Hukum Ohm:

$$i_f = \frac{e_f}{Z_1} \quad i_t = \frac{e_t}{Z_2} \quad i_r = \frac{e_r}{Z_1} \quad 3.3$$

Substitusi ke persamaan 3.3 ke dalam persamaan 3.2 diperoleh:

$$\frac{e_t}{Z_2} = \frac{e_f}{Z_1} - \frac{e_r}{Z_1} \quad 3.4$$

Dari persamaan 3.1 diperoleh tegangan e_r dan jika tegangan ini disubstitusi ke dalam persamaan 3.4, maka diperoleh:

$$\frac{e_t}{Z_2} = \frac{e_f}{Z_1} - \frac{e_t - e_f}{Z_1}$$

$$\frac{e_t}{Z_2} + \frac{e_t}{Z_1} = \frac{2e_f}{Z_1}$$

atau

$$e_t \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} = \frac{2e_f}{Z_1}$$

atau

$$e_t = e_f \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad 3.5$$

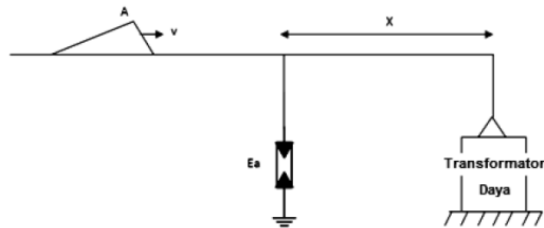
Dengan cara yang sama tegangan yang dipantulkan dapat diturunkan, diperoleh:

$$e_r = e_f \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad 3.6$$

Jika Z_2 adalah transformator, maka $Z_2 = \infty$, maka tegangan yang diteruskan pada terminal transformator adalah:

$$e_t = 2e_f \quad 3.7$$

Artinya, tegangan pada terminal transformator dua kali tegangan yang datang menuju terminal transformator. Kondisi arrester terpasang di antara jaringan dengan transformator.



Gambar 3.4 Jarak arrester dan trafo

Suatu gelombang tegangan (e_s) merambat menuju terminal arrester, arrester bekerja sehingga gelombang yang diteruskan ke transformator adalah seperti gelombang e_f , dimana kecuraman muka gelombang sama dengan gelombang semula dan puncaknya sama dengan tegangan percik arrester (V_a). Menurut persamaan 3.4, tegangan pada terminal transformator adalah dua kali tegangan yang datang. Jika $t = 0$ dihitung saat gelombang e_s tiba di terminal arrester dan kecepatan merambat gelombang adalah v , maka waktu tempuh gelombang dari terminal arrester ke terminal transformator adalah:

$$t = \frac{l}{v} \quad 3.8$$

Tegangan maksimum terminal transformator pada pantulan pertama dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_t = V_a + 2 \times t \times \lambda \quad 3.9$$

Atau

$$V_t = V_a + 2 \times l/v \times \lambda \quad 3.10$$

dimana :

l = jarak maksimal arrester dengan peralatan (m)

V_t = tegangan pada terminal transformator

- V_a = tegangan percikan arrester (kV)
 λ = kecuraman muka gelombang tegangan surja (kV/ μ s)
 v = kecepatan merambat tegangan surja (m/ μ s)

Rating tegangan arrester dapat dicari dengan persamaan dibawah ini: U = Tegangan rms fasa ke fasa $\times 1.10 \times k_o$ efisien pentanahan. Besarnya koefisien pentanahan bergantung pada jenis pentanahan dari sistem yaitu ^[4] :

- Sistem yang ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 0,8. Penangkap petirnya disebut sebagai penangkap petir 80 %.
- Sistem yang tidak ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 1,0. Penangkap petirnya disebut sebagai penangkap 100 %.

Maka untuk sistem tegangan 150 kV, rating arrester yang dipakai adalah :

- sistem yang ditanahkan secara langsung :

$$U = (150 \times 1.1 \times 0.8) \quad 3.11$$

$$= 132 \text{ kV}$$
- sistem yang tidak ditanahkan secara langsung :

$$U = (150 \times 1.1 \times 1.0) \quad 3.12$$

$$= 165 \text{ kV}$$

Analisa yang dilakukan diasumsikan sistem tenaga listrik ditanahkan secara langsung.

3.5 Jarak Lindung Penangkap Petir

Sebuah gelombang terpa yang berjalan menuju gardu akan dipotong amplitudonya oleh penangkap hingga hanya mempunyai amplitude sebesar tegangan kerja penangkap petir. Gelombang yang mempunyai kecuraman yang sama dengan gelombang aslinya ini akan terus berjalan ke gardu induk. Jika gardu ini merupakan ujung dari hantaran atau terhubung langsung ke trafo maka gelombang ini akan dipantulkan kembali ke penangkap petir dua kali lebih besar dari gelombang datangnya dan gelombang negatif akan dipantulkan kembali dari penangkap petir ke trafo. Tegangan gelombang datang maksimum yan terjadi pada trafo setelah pantulan pertama adalah:

$$U_t = U_A + 2 \frac{du}{dt} \times L/V \text{ dimana: } U_t = 2 U_a \quad 3.13$$

dimana:

U_t = tegangan gelombang datang pada trafo (kV)

U_A = tegangan kerja arrester (kV)

du/dt = kecuraman gelombang datang (kV/ μ s)

V = kecepatan rambat gelombang (di udara : 300 m/ μ s)

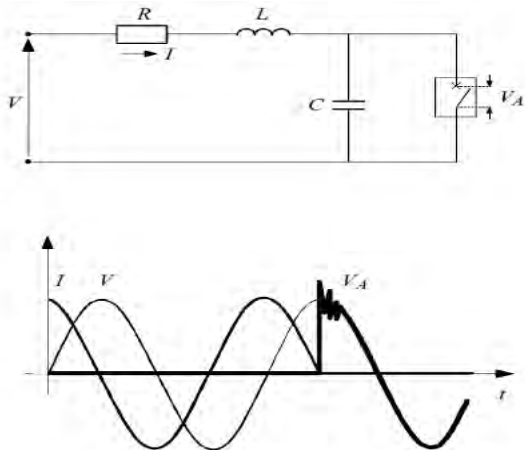
L = jarak antara trafo ke penangkap petir (m)

Jika U_t adalah harga tegangan dari TID trafo, maka jarak lindung penangkap petir tersebut adalah:

$$L = \frac{U_t - U_a}{2 \frac{du}{dt}} V \quad 3.14$$

3.6 Permodelan Tegangan Lebih *Switching*

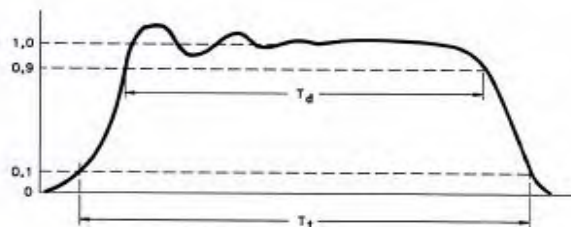
Permodelan tegangan lebih *switching* akan dimodelkan dengan simulasi ATP/EMTP. Tegangan lebih transien yang terjadi akibat proses pemberian tenaga pada sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban bisa mencapai 1,5 – 2,5 kali tegangan nominal pada ujung penerima, tergantung karakteristik saluran transmisi yang dipakai. Gangguan tegangan lebih pada transmisi dan distribusi sistem tenaga listrik biasanya disebabkan oleh dua macam tegangan surja yaitu surja petir dan surja hubung yang mempunyai amplitudo lebih besar dari nilai puncak tegangan nominalnya. Salah satu sumber tegangan lebih surja hubung adalah peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga. Besarnya amplitudo tegangan saat pelepasan beban selalu berkorelasi dengan tegangan sistem dan frekuensi osilasi yang dipengaruhi oleh impedansi sistem. Gejala surja hubung pada saluran transmisi dapat diselesaikan dengan membuat rangkaian ekuivalen satu fasa. Sehingga tiap fasa diasumsikan dapat berdiri sendiri, hal tersebut berlaku jika pemutusan tenaga pada masing-masing fasa menutup secara serentak (*simultaneous*). Gambar 3.5 menunjukkan permodelan rangkaian dan hasil tegangan terhadap pensaklaran.



Gambar 3.5 Rangkaian *switching* dan respon gelombang impuls

Gambar 3.5 dapat dijelaskan bahwa apabila busur antara kontrol-kontrol CB terputus, tegangan sistem sepenuhnya akan mengalami pemulihan yang tiba-tiba terjadi pada celah terbuka antar kontak tersebut. Tegangan ini terdiri dari komponen frekuensi tinggi yang dilapiskan pada tegangan sistem normal dan totalnya dinamakan *restriking voltage* dan membentuk surja *switching*, ketika CB membuka terjadi penghentian arus yang besarnya sama dan arahnya berlawanan ke dalam sistem, arus ini berbentuk sinusoidal. Tegangan restriking dapat mencapai harga maksimum dua kali lipat harga puncak tegangan pemulihan sistem.

Bentuk respon gelombang impuls pada gambar 3.5 adalah bentuk "*rectangular current impulse*" (standart 60060-1, 60099-4, 61643-1 and 61312-1) seperti gambar 3.6.



Gambar 3.6 Parameter waktu RCI

Standard exponential impulse currents acc. to IEC 60060-1				
waveshape	Front time T_1	Time to half value T_2	Peak value	Polarity reversal
1/20	$1 \mu s \pm 10\%$	$20 \mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	= 20%
4/10	$4 \mu s \pm 10\%$	$10 \mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	= 20%
8/20	$8 \mu s \pm 10\%$	$20 \mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	= 20%
30/80	$30 \mu s \pm 10\%$	$80 \mu s \pm 10\%$	$\pm 10\%$	= 20%
Standard rectangular impulse currents acc. to IEC 60060-1				
	Duration of the peak T_d	Total Duration T_t	Peak value	Polarity reversal
	$500 \mu s +20\%; -0\%$	$= 1.5 \times T_t$	$+20\%; -0\%$	= 10%
	$1000 \mu s +20\%; -0\%$	$= 1.5 \times T_t$	$+20\%; -0\%$	= 10%
	$2000 \mu s +20\%; -0\%$	$= 1.5 \times T_t$	$+20\%; -0\%$	= 10%
	$2000 \mu s < T_d < 3200 \mu s$	$= 1.5 \times T_t$	$+20\%; -0\%$	= 10%

Gambar 3.7 IEC 60060-1 standart arus impuls *exponential* dan *rectangular*

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

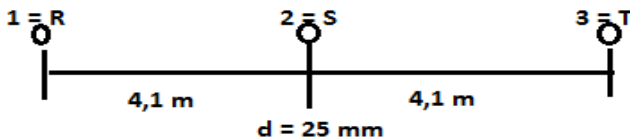
4.1 Perhitungan Parameter Saluran Transmisi

Untuk membuat permodelan saluran transmisi 150 kV, maka terlebih dahulu perlu data karakteristik menara yang akan di dimodelkan menggunakan program ATP/EMTP. Data karakteristik menara ini nantinya akan digunakan untuk menghitung nilai parameter saluran. Nilai-nilai ini kemudian akan dipakai dalam rangkaian simulasinya. Data-data yang dibutuhkan dalam perhitungan berdasarkan pada bab 3. Tegangan input tiga fasa yang digunakan adalah tegangan puncak fasa ke tanah sehingga sistem yang digunakan adalah 150 kV (tegangan sistem), dengan tegangan puncak inputnya adalah,

$$\text{Tegangan puncak input (Vm)} = 150 \text{ kV} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 122.474 \text{ kV}$$

Perhitungan induktansi suatu saluran tiga fasa rangkaian tunggal (*single circuit*) dari tabel 4.1 dengan asumsi bahwa penghantar konduktor tunggal yang dipakai adalah ACSR Drake, adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung GMD (*Geometric Mean Distance*).



$$GMD = \sqrt[3]{d_{12} \times d_{23} \times d_{31}}$$

$$GMD = \sqrt[3]{4,1 \times 4,1 \times 8,2} = 5,17 \text{ m} = 16,96 \text{ ft}$$

- b. Menghitung induktansi saluran tiga fasa rangkaian tunggal untuk penghantar ACSR Drake yang diperoleh dari tabel ACSR sebesar 0,0373 ft.

$$GMR_{r'} = \sqrt{0,0373 \times 0,3048 \times 0,025} = 0,0168 \text{ m}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR_{r'}} \text{ H/m}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{16,96}{0,0168} = 13,8 \cdot 10^{-7} H/m$$

- c. Menghitung harga kapasitansi ke netralnya dengan diameter luar penghantar ACSR Drake adalah 1,108 in (dari tabel ACSR hal 126), adalah sebagai berikut:

$$GMR_r = \frac{1,108}{2 \times 12} = 0,0462 \text{ ft}$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\ln \frac{GMD}{GMR_r}} \text{ F/m}$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{16,96}{0,0462}} = 9,41 \times 10^{-12} F/m$$

Dari hasil perhitungan induktansi dan kapasitansi, dianggap bahwa saluran ideal yang berarti tidak ada rugi-rugi, sehingga resistansi R dan G diabaikan, maka impedansi surja dari persamaan (2.23) adalah:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{13,8 \cdot 10^{-7}}{9,41 \cdot 10^{-12}}} = 382,95 \Omega/m$$

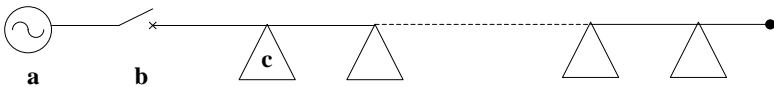
4.2 Permodelan dan Analisa Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi 150 kV

SUTT dimodelkan sebagai saluran tunggal (*single circuit*) yang memiliki panjang saluran 10,740 km dan mempunyai 28 buah menara, maka karakteristik salurannya adalah saluran transmisi pendek karena jaraknya kurang dari 80 km (50 mile). Data-data untuk simulasi diambil dari saluran transmisi 150 kV gardu induk waru dengan asumsi bahwa saluran tersebut ideal sesuai dengan perhitungan di sub bab 4.1 dan pengamatan hanya dilakukan di awal (v_1), tengah (v_14), dan ujung saluran (v_28). Untuk permodelan SUTT digunakan LCC (*Line Constant*) dengan sistem saluran udara. Simulasi permodelan ATP/EMTP pada saat kondisi awal, saluran transmisi mendapatkan sumber *switching* akibat proses pengisian trafo secara tiba-tiba sehingga menyebabkan terjadinya tegangan lebih transien yang dapat merusak peralatan apabila melebihi batas yang diijinkan. Permodelan awal dengan

simulasi ATP/EMTP digunakan saluran transmisi tanpa beban dan berbeban tanpa adanya pemasangan arrester.

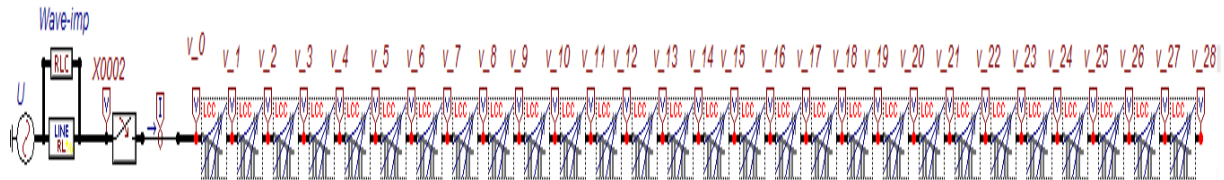
4.2.1 Permodelan ATP/EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban

Saluran transmisi dimodelkan sebagai saluran tunggal dengan menggunakan LCC (*Line Constant*) tiga fasa yang memiliki 28 menara, yaitu menara dengan jarak terdekat dengan sumber *switching* (menara ke-0) berurutan sampai menara dengan jarak terdekat dengan peralatan (menara ke-28). Menara tersebut ditandai dengan *probe voltage* yang diberi nama v_0 sampai v_{28} . Permodelan saluran transmisi tanpa beban dimodelkan tanpa menggunakan arrester seperti ditunjukkan pada gambar 4.1 di bawah ini.



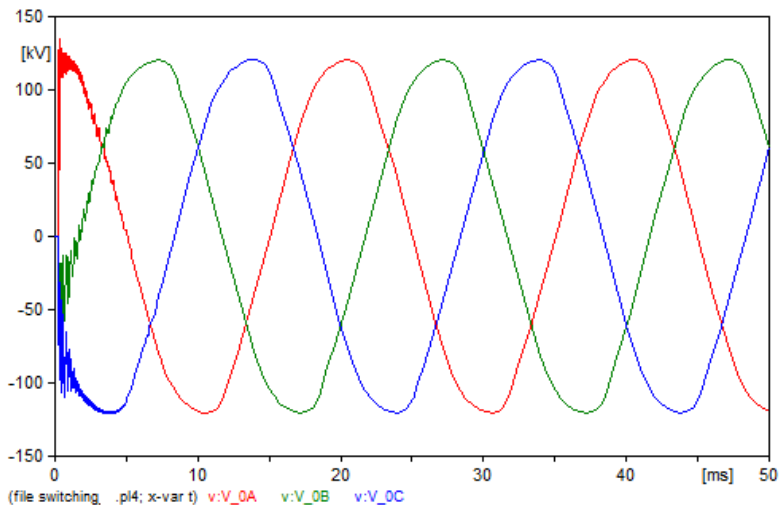
Gambar 4. 1 Permodelan saluran transmisi tanpa beban

Mengacu pada Gambar 4.1, permodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator tiga fasa (a) yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (b) dan terhubung pada 28 menara transmisi (c). Berikut ini adalah Gambar permodelan dengan program ATP :

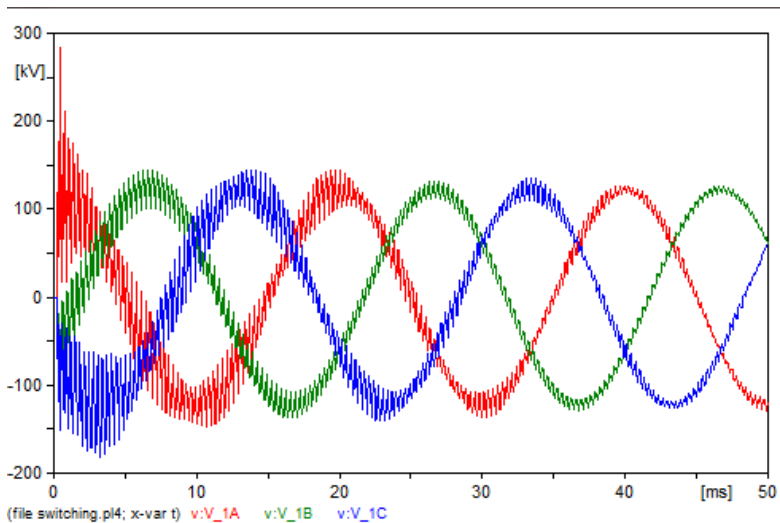


Gambar 4.2 Pemodelan ATP/EMTP saluran transmisi tanpa beban

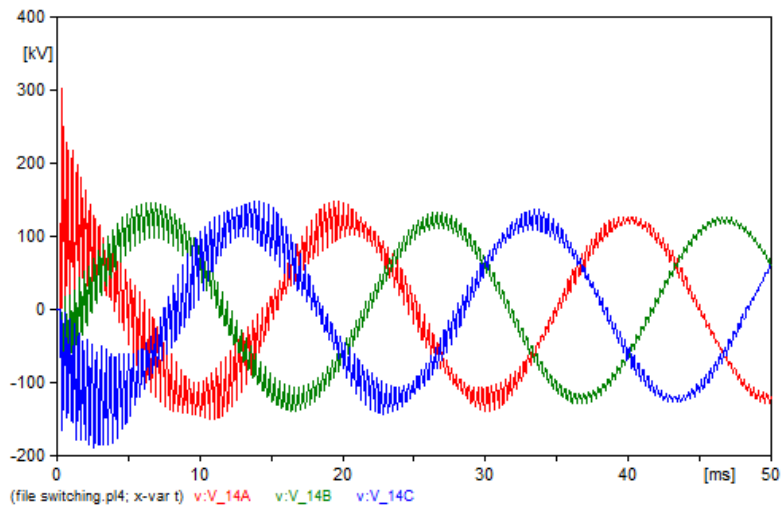
Untuk mengetahui tegangan lebih sementara pada saluran udara akibat sumber *switching* dilakukan pengukuran tegangan puncak pada menara. Tegangan yang terukur adalah tegangan puncak fasa ke tanah serta dilakukan pengukuran pada waktu puncak. Pemodelan dipilih menggunakan tipe JMarti. Pemodelan sesuai dengan data pendekatan pada GI Waru 150 k V dengan standar IEC-71 gelombang tegangan impuls surja hubungnya 250/2500 μ s. Simulasi dijalankan pada saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban kemudian saklar ditutup untuk memasukan tegangan sebesar 122.474 kV. Dari hasil simulasi didapatkan karakteristik tegangan lebih transient yang terjadi di saluran transmisi 150 kV Waru-Karangpilang karena proses *switching* yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



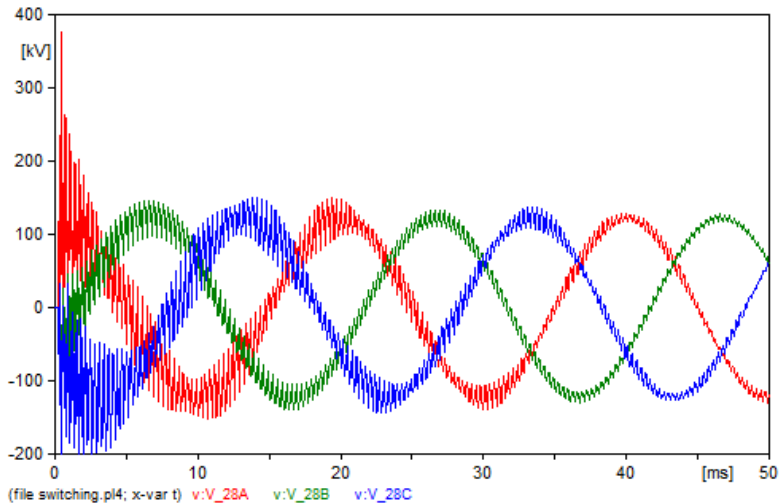
Gambar 4.3 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban



Gambar 4.4 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban pada menara ke-1



Gambar 4.5 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban pada menara ke-14



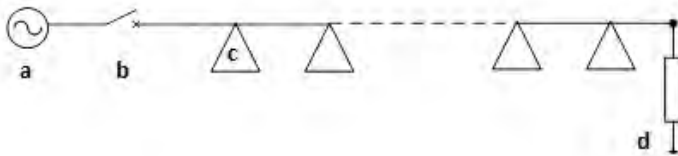
Gambar 4.6 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban pada menara ke-28

4.2.2 Permodelan ATP/EMTP Saluran Transmisi Berbeban

Saluran transmisi dimodelkan diberi tambahan beban penuh pada akhir saluran transmisi yaitu beban resistif. Data saluran transmisi jurusan Waru-Karangpilang pada tabel 3.1 didapatkan nilai arus nominal sebesar 1480 A. Maka beban resistif didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut :

$$R = \frac{V_{L-L}}{I} = \frac{150 \times 10^3 \text{ Volt}}{1480 \text{ Ampere}} = 101.35 \text{ ohm } (\Omega)$$

Pemodelan yang dilakukan dengan menambah beban resistif (beban 3 fasa yang terhubung delta atau Δ) yang dipasang pada sisi akhir saluran transmisi. Beban tersebut dimodelkan dengan menggunakan beban tiga fasa dengan nilai resistansi (R) sebesar 50 ohm dan 101.35 ohm. Permodelan dilakukan dengan tujuan untuk mengamati tegangan puncak pada menara akibat *switching* ketika CB di *closed* saat kondisi beban penuh. Pada pemodelan saluran transmisi dengan beban resistif tanpa pemasangan arrester ditunjukkan pada gambar 4.7.



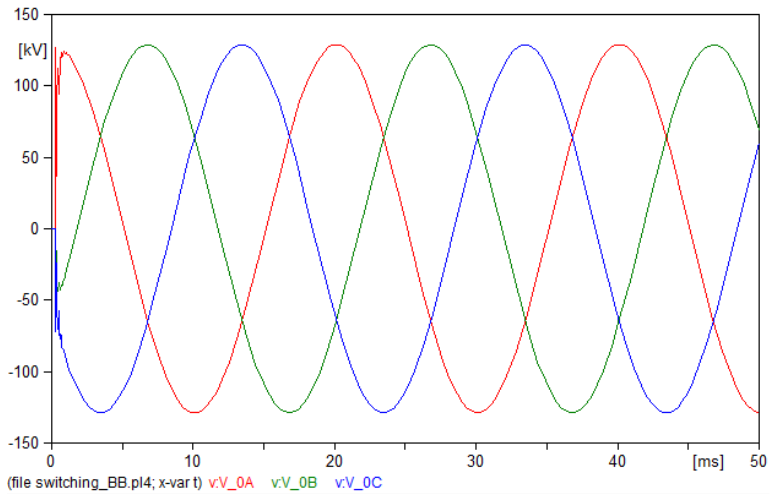
Gambar 4.7 Pemodelan saluran transmisi berbeban

Pada pemodelan simulasi kali ini saluran transmisi diberi beban *full load*. Pada gambar 4.7, pemodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator tiga fasa (a) yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (b) dan terhubung pada 28 menara transmisi (c), dan di akhir saluran terdapat beban resistif (d). Gambar pemodelan dengan saluran berbeban yang ditunjukkan pada gambar 4.8.

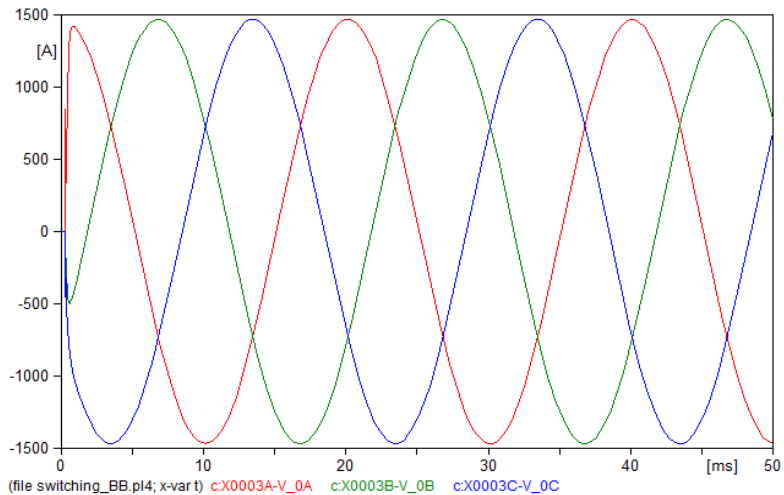


Gambar 4.8 Pemodelan saluran transmisi berbeban

Hasil simulasi dari permodelan ATP/EMTP dalam keadaan berbeban yang ditunjukkan pada gambar 4.9.

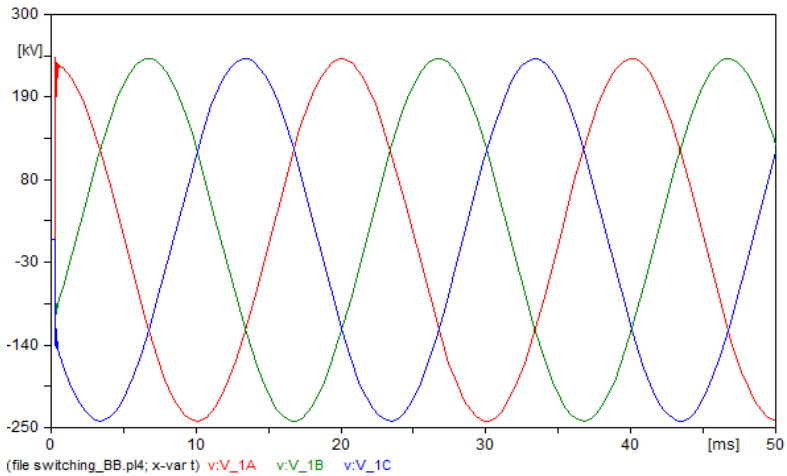


Gambar 4.9 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban

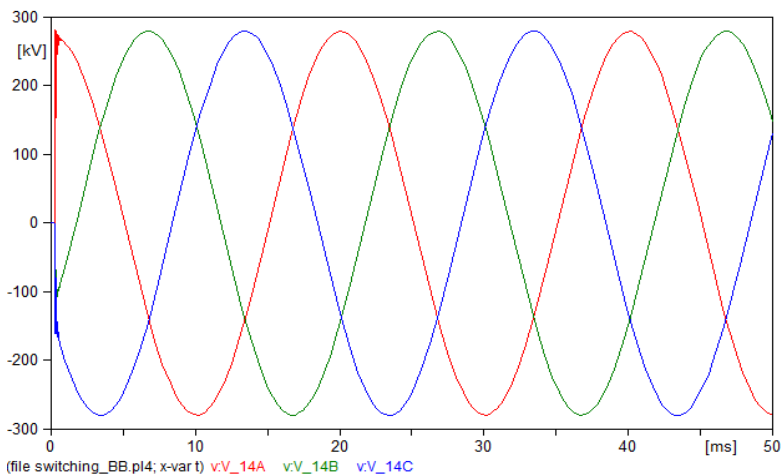


Gambar 4.10 Hasil simulasi arus puncak saluran transmisi berbeban

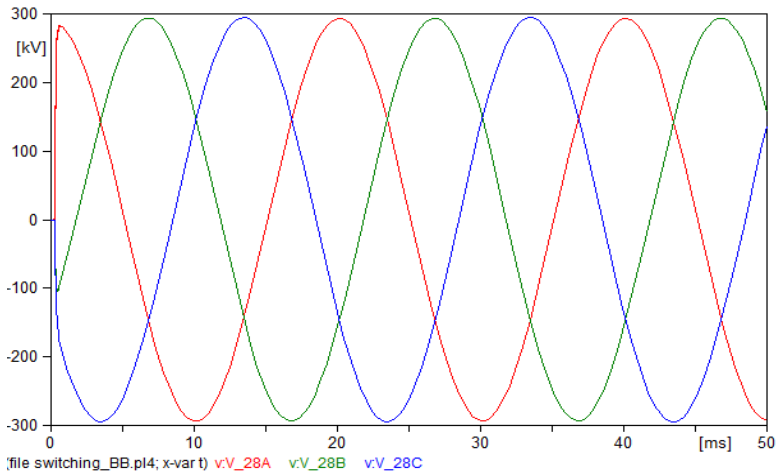
Hasil simulasi dari permodelan ATP/EMTP dengan beban resistansi sebesar $R = 50 \text{ ohm}$ adalah sebagai berikut:



Gambar 4.11 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-1 dengan $R = 50 \text{ ohm}$

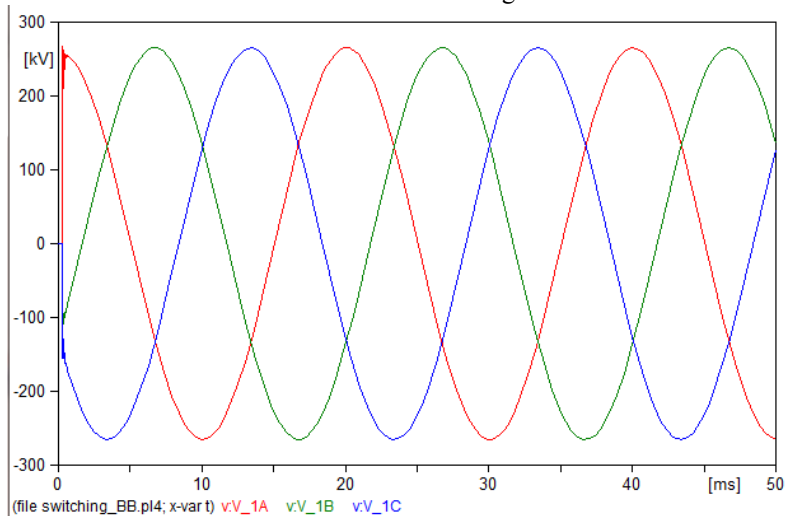


Gambar 4.12 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-14 dengan $R = 50 \text{ ohm}$

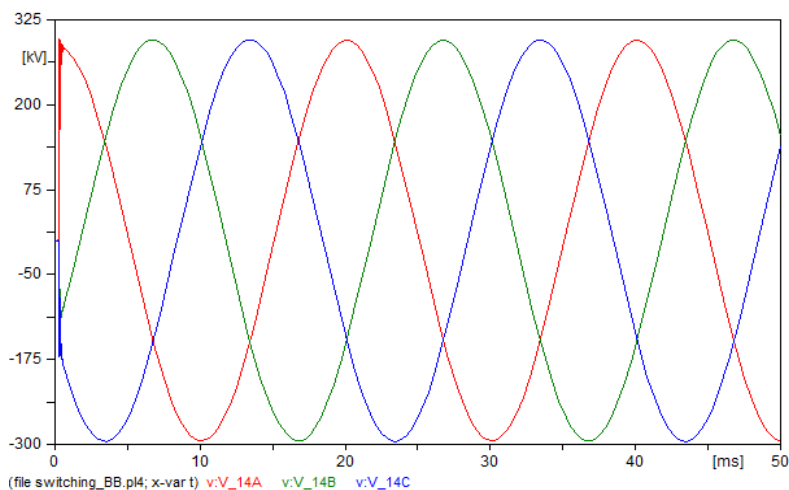


Gambar 4.13 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-28 dengan $R = 50$ ohm

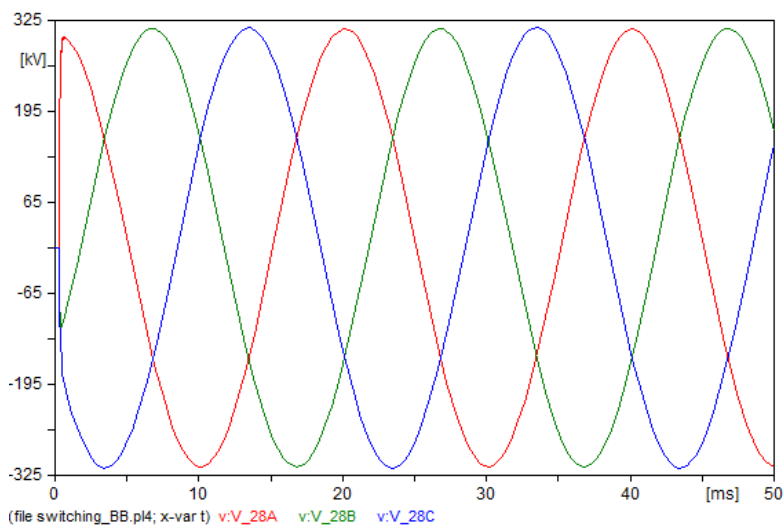
Hasil simulasi dari permodelan ATP/EMTP dengan beban resistansi sebesar $R = 101.35$ ohm adalah sebagai berikut:



Gambar 4.14 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-1 dengan $R = 101.35$ ohm



Gambar 4.15 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-14 dengan $R = 101.35$ ohm



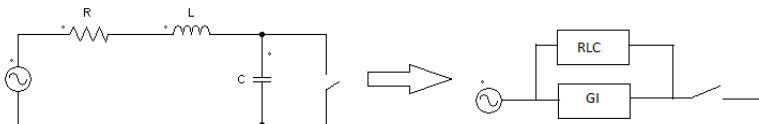
Gambar 4.16 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban pada menara ke-28 dengan $R = 101.35$ ohm

4.3 Analisa Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban dan Berbeban

Analisa hasil simulasi pada kondisi saluran transmisi 150 kV pada tegangan puncak tiap menara yang berbeda-beda dapat dilihat pada grafik tegangan puncak tiap menara untuk kondisi saluran transmisi tanpa beban dan berbeban dengan resistansi sebesar 50 ohm dan resistansi 101.35 ohm.

4.3.1 Analisa Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi Tanpa Beban

Analisa hasil simulasi saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban adalah ditunjukkan pada gambar 4.3, dimana permodelan dilakukan menggunakan sumber generator 3 fasa dihubungkan dengan *circuit breaker* (CB) sehingga hasil simulasi tegangan berbentuk sinusoidal dengan nilai tegangan puncak. Nilai yang terukur adalah tegangan puncak 3 fasa ke tanah sebesar 122.474 kV. Tegangan tersebut berbentuk sinusoidal karena inputannya tegangan AC yang berasal dari sumbernya yaitu generator 3 fasa. Simulasi rangkaian dengan adanya saklar (sumber *switching*) yang menggunakan sumber generator 3 fasa dihubungkan CB dengan $t_{\text{closed}} = 250 \mu\text{s}$ (0.25 ms). Tegangan yang terukur adalah tegangan puncak 3 fasa ke tanah sebesar 122.474 kV. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa saat $t_{\text{closed}} = 0.25 \text{ ms}$, maka terbentuk rangkaian tertutup yang terdiri dari sumber generator 3 fasa dan hubungan seri RLC yang terhubung dengan GI (Gardu Induk). Gambar dibawah ini menunjukkan rangkaian sumber *switching*.



Gambar 4.17 Rangkaian sumber *switching*

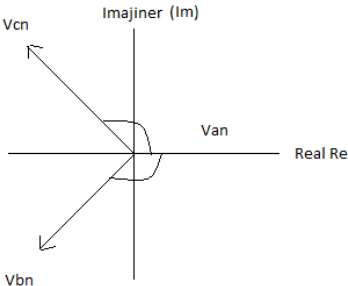
Saat $t = 0.25 \text{ ms}$ terjadilah perubahan gelombang pada sistem tersebut dan gejala yang timbul selama terjadi perubahan itulah yang disebut gejala transien. Gejala transien merupakan tanggapan rangkaian seri RLC setelah saklar ditutup yaitu saat $t > 0.25 \text{ ms}$. Untuk hasil simulasi gelombang tegangannya dapat dirumuskan sebagai berikut :

Fungsi sinus :

$y = A_c \cos \omega t + A_s \sin \omega t$ 4.1

$A_c = A \cos \theta$ dan $A_s = -A \sin \theta$ 4.2

Dari hasil rumusan tersebut bahwa sudut fasa (θ) mencakup koefisien amplitudonya (A_c dan A_s), dimana pada fasa A (Warna merah) adalah amplitude cosinus (A_c) sedangkan pada fasa B dan fasa C (Warna hijau dan biru) adalah amplitude sinus sehingga didapatkan nilai sudut fasa dan fungsi sinus yang dinyatakan dengan rumus : $\tan \theta = \frac{A_s}{A_c}$, Tegangan yang terukur adalah tegangan puncak 3 fasa seimbang dapat digambarkan sebagai berikut :



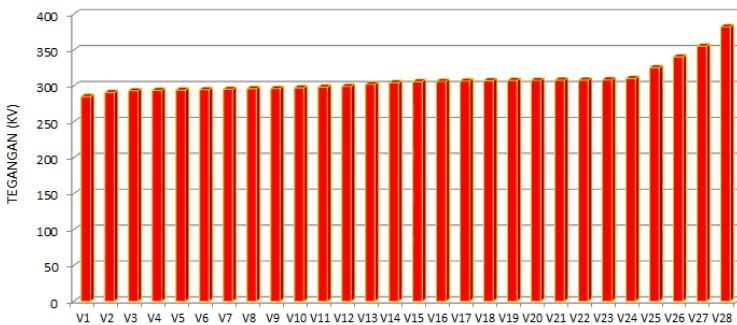
$V_{an} < 0^\circ, V_{bn} < -120^\circ, V_{cn} < -240^\circ$

Gambar 4.18 Tegangan puncak 3 fasa seimbang

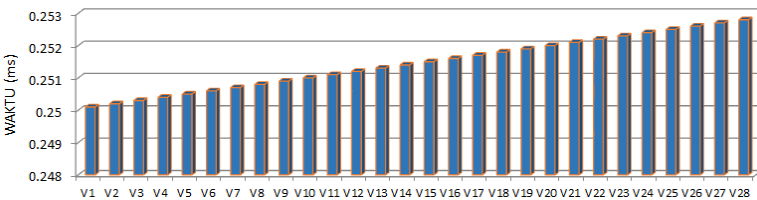
Pada gambar 4.4 sampai dengan gambar 4.6 menunjukan simulasi saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban kemudian saklar ditutup untuk memasukkan tegangan sebesar 122.474 kV. Dari hasil simulasi didapatkan profil dan karakteristik tegangan lebih transien yang terjadi di menara ke-1, menara ke-14, dan menara ke-28 pada saluran transmisi 150 kV jurusan Waru-Karangpilang karena proses *switching* atau *energized* (proses pemberian tenaga atau proses mengalir sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban dengan sumber tegangan melalui operasi penutupan saklar) di GI 150 kV Waru.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa magnititude tegangan lebih transien pada menara ke-1 sebesar 285 kV ($v_{_1}$) dan menara ke-14 sebesar 304 kV ($v_{_14}$) sedangkan menara yang terletak di ujung saluran (menara ke-28) sebesar 382 kV ($v_{_28}$), dimana tegangan-tegangan

tersebut hampir dua kali tegangan di ujung pengirim yaitu 122.474 kV. Hal tersebut disebabkan adanya operasi penutupan saklar dan $t_{closed}=0.25$ ms sehingga terjadi kenaikan tegangan (tegangan lebih). Tegangan lebih ini akan merambat sepanjang saluran transmisi berbentuk gelombang berjalan. Gelombang berjalan dalam sistem transmisi timbul akibat adanya tegangan lebih pada sistem. Tegangan lebih transien berlangsung sangat cepat yang makin lama makin mengecil dan mencapai keadaan tunak (*steady state*). Gambar 4.19 menunjukkan diagram batang hasil simulasi saluran transmisi tanpa beban dan pada gambar 4.20 menunjukkan diagram batang hasil simulasi saluran transmisi tanpa beban



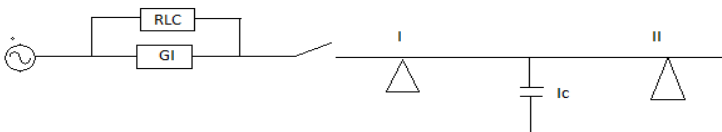
Gambar 4.19 Diagram tegangan saluran transmisi tanpa beban



Gambar 4.20 Diagram waktu saluran transmisi tanpa beban

Pada gambar 4.19 dapat dijelaskan bahwa saluran transmisi 150kV dalam keadaan tanpa beban memiliki 28 menara transmisi, dimana tegangan yang dihasilkan berbeda-beda, hal tersebut disebabkan karena adanya gelombang berjalan suatu saluran transmisi mencapai

titik transisi pada rangkaian terbuka sehingga sangat berbahaya bagi koordinasi sistem osilasinya dan tegangan lebih yang masuk ke peralatan menjadi lebih tinggi dan berbahaya untuk peralatan dengan adanya gelombang berjalan (surja tegangan) akibat proses *switching* tenaga listrik pada jaringan, karena gelombang berjalan menuju ke transformator akan melihat transformator sebagai suatu ujung terbuka (karena transformator mempunyai isolasi terhadap bumi atau tanah) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang, berarti transformator dapat mengalami tegangan surja dua kali besarnya tegangan gelombang surja yang datang dan juga pada setiap saluran transmisi terdapat arus kapasitif (IC) yang menyebabkan terjadinya tegangan lebih pada menara ke-1 dan menara selanjutnya sampai menyebabkan menara ke-28 yang dekat dengan peralatan, dimana peralatan dianggap sebagai rangkaian yang terbuka.



Gambar 4.21 Arus kapasitif (IC) pada saluran transmisi 150 kV

Dengan adanya arus kapasitif di setiap saluran transmisi pada gambar 4.21, maka saat terjadi tegangan lebih di menara ke-1 maka menara ke-2 akan terkena imbasnya yang menyebabkan tegangan di menara ke-2 mengalami kenaikan tegangan (tegangan lebih). Untuk gelombang tegangan pada menara ke-1 dan menara ke-2 sampai menara ke-28 berbeda karena fungsi sinus yang mempengaruhinya, maka untuk meredam tegangan lebih transien diperlukan pemasangan arrester MOV pada saluran transmisi 150 kV di Gardu Induk Waru. Hasil pengukuran tegangan dan waktu puncak pada saluran transmisi tanpa beban terdapat di lampiran.

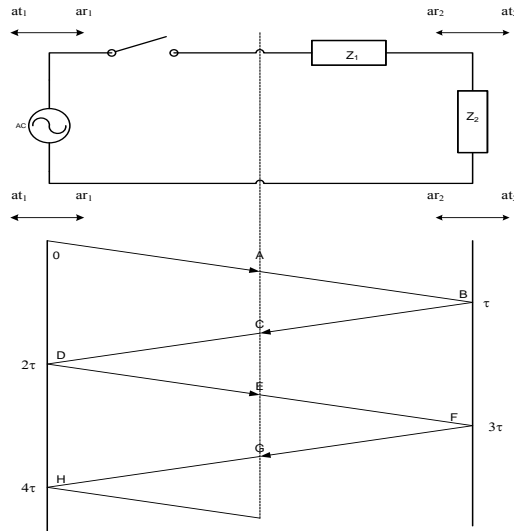
Pada gambar 4.20 menunjukkan bahwa semakin jauh posisi menara semakin lama waktu yang dibutuhkan tegangan lebih untuk sampai ke menara, dimana dihasilkan waktu tegangan puncak tertinggi sebesar 0.2528 ms pada menara ke-28.

4.3.2 Analisa Transien Pada Gelombang Berjalan

Pada permodelan rangkaian saluran transmisi tanpa beban, ujung saluran merupakan suatu rangkaian yang terbuka sehingga nilai impedansi penerima (Z_R) adalah tak terhingga dan didapatkan nilai koefisien pantulan pada ujung penerima = 1, dengan demikian tegangan terjadi pada ujung penerima menjadi dua kali tegangan pada sumber tegangan atau pada ujung pengirim. Besar tegangan lebih transien sangat tergantung pada impedansi surja (Z_c) yang dirumuskan sebagai berikut :

$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$, dimana impedansi surja sangat berpengaruh terhadap koefisien pantulan pada ujung penerima.

Analisa transien pada gelombang berjalan dalam perhitungan menggunakan diagram lattice, dimana besar impedansi surja ($Z_c = Z_1$) sebesar 382,95 ohm/m (*perhitungan ditunjukkan pada sub bab 4.1*) dan peralatan trafo dianggap sebagai jepitan terbuka sehingga memiliki nilai $Z_L = Z_2 = \infty$ (tak terhingga) sedangkan impedansi pentanahan (Z_g) = 0, dengan waktu puncak berlangsungnya surja hubung menurut standar IEC adalah 250 μ s (0,25 ms).



Gambar 4.22 Diagram *lattice*

Koefisien pantulan dan terusan diagram *Lattice* pada gambar 4.22 adalah,

$$ar_1 = \frac{Z_G - Z_1}{Z_G + Z_1} = \frac{0 - 382.95}{0 + 382.95} = -1$$

$$at_1 = 1 + ar_1 = \frac{2Z_G}{Z_G + Z_1} = 0$$

$$ar_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\infty - 382.95}{\infty + 382.95} = 1$$

$$at_2 = 1 + ar_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 2$$

Hasil simulasi bahwa $e_t = 122.474$ kV Oleh sebab itu dari diagram *Lattice* diperoleh nilai sebagai berikut:

$$A = e_t = 122.474 \text{ kV}$$

$$B = A \times at_2 = 2 \times e_t = 244.95 \text{ kV}$$

$$C = A \times ar_2 = 1 \times e_t = 122.474 \text{ kV}$$

$$D = C \times at_1 = 122.474 \times 0 = 0 \text{ kV}$$

$$E = C \times ar_1 = 122.474 \times -1 = -122.474 \text{ kV}$$

$$F = E \times at_2 = -122.474 \times 2 = -244.95 \text{ kV}$$

$$G = E \times ar_2 = -122.474 \times 1 = -122.474 \text{ kV}$$

$$H = G \times at_1 = -122.474 \times 0 = 0 \text{ kV}$$

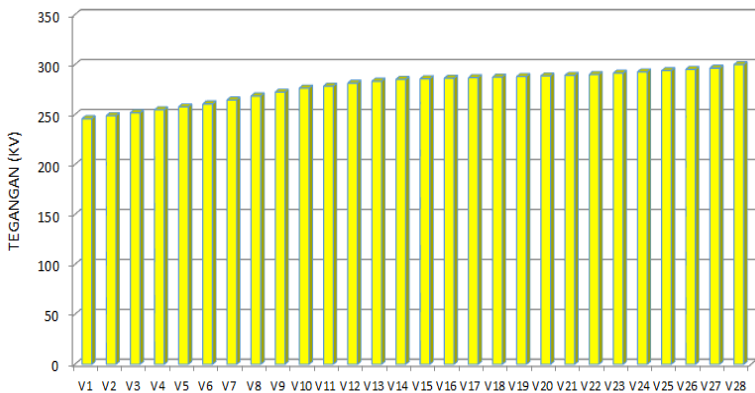
Pada gambar 4.4 sampai dengan 4.6 menunjukkan bahwa trafo (ZL) dianggap sebagai ujung terbuka (karena trafo mempunyai isolasi terhadap tanah/bumi) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang sehingga trafo dapat mengalami tegangan surja dua kali tegangan gelombang surja yang datang dan hasil perhitungan pada diagram *Lattice* didapatkan bahwa tegangan lebih transien yang terjadi di ujung penerima saluran transmisi 150 kV yang terbuka dapat mencapai dua kali tegangan yang dikenakan di ujung pengirim.

4.3.3 Analisa Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi Berbeban

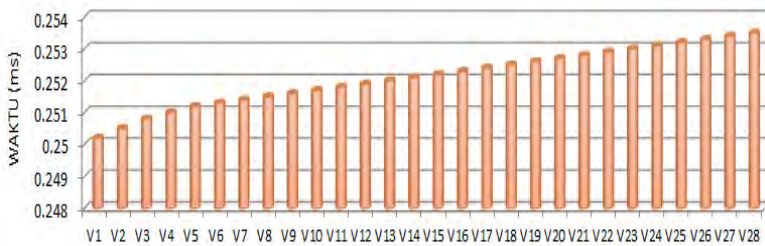
Analisa hasil simulasi saluran transmisi dalam keadaan berbeban adalah pada gambar 4.9 dijelaskan bahwa permodelan dilakukan menggunakan sumber generator 3 fasa dihubungkan dengan *circuit breaker* (CB) yang terhubung 28 menara dimana di akhir saluran

terdapat beban resistif dengan nilai resistansi (R) sebesar 50 ohm dan 101.35 ohm sehingga hasil simulasi tegangan berbentuk sinusoidal dengan nilai tegangan puncak yang terukur (tegangan puncak 3 fasa ke tanah) sebesar 122.474 kV dengan $t_{\text{closed}} = 250 \mu\text{s}$ (0.25 ms).

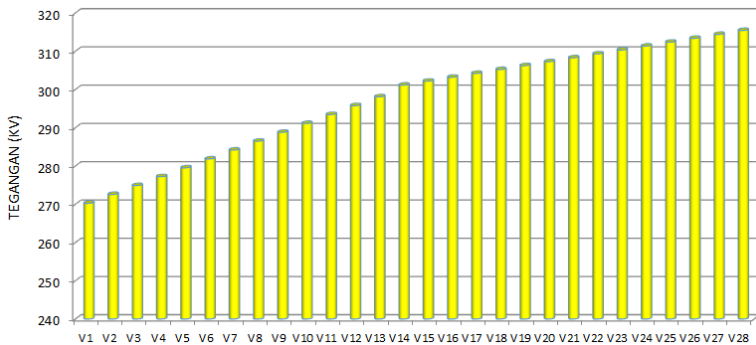
Pada gambar 4.11 sampai dengan 4.16 tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar beban resistif yang diberikan maka semakin besar pula tegangan lebih *switching* yang dihasilkan hal ini terlihat pada hasil simulasi dengan beban $R = 50 \text{ Ohm}$ dan $R=101.35 \text{ Ohm}$, dimana tegangan lebih *switching* pada beban $R=101.35 \text{ Ohm}$ lebih besar dari tegangan pada beban $R=50 \text{ Ohm}$ dengan arus yang dihasilkan yaitu sebesar 1,48 kA (1480 A) disamping itu dari hasil simulasi juga menunjukkan bahwa semakin dekat posisi menara dengan beban $R=50 \text{ Ohm}$ atau $R=101.35 \text{ Ohm}$ maka tegangan lebih *switching* akan diperhalus karena pada beban tersebut dipasang *grounding* di peralatannya. Gambar 4.23 dan 4.25 menunjukkan diagram batang tegangan saluran transmisi berbeban 50 ohm dan 101.35 ohm sedangkan gambar 4.24 dan 4.26 adalah diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban 50 ohm dan 101.35 ohm.



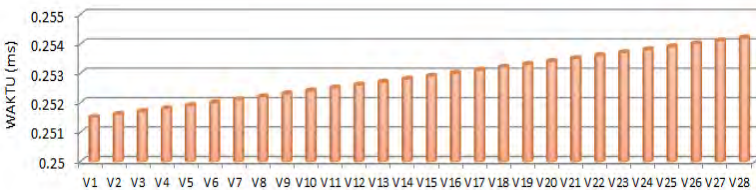
Gambar 4.23 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 50 ohm



Gambar 4.24 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 50 ohm



Gambar 4.25 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 101.35 ohm



Gambar 4.26 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban resistansi 101.35 ohm

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa magnitudo tegangan lebih transien berbeban 50 ohm pada menara ke-1 sebesar 245.82 kV (v_1), menara ke-14 sebesar 285.16 kV (v_{14}) dan menara yang terletak di ujung saluran (menara ke-28) sebesar 300.01 kV (v_{28}), sedangkan magnitudo tegangan lebih transien berbeban 101.35 ohm pada menara ke-1 sebesar 270.25 kV (v_1) dan menara ke-14 sebesar 301.15 kV (v_{14}) sedangkan menara yang terletak di ujung saluran (menara ke-28) sebesar 315.43 kV (v_{28}), dimana tegangan-tegangan tersebut hampir dua kali tegangan di ujung pengirim yaitu 122.474 kV (v_0). Dari hasil simulasi tersebut tegangan lebih berbeban saat $R = 101.35$ ohm lebih meningkat dibandingkan dengan $R = 50$ ohm karena semakin besar resistansinya maka tegangan akan meningkat sehingga diperlukan pemasangan arrester agar dapat mengurangi tegangan lebih.

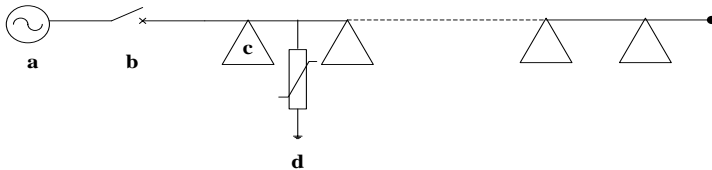
Apabila dilihat dari hasil simulasi keseluruhan untuk waktu puncak pada tiap menara pada gambar 4.24 dan 4.26 didapatkan nilai waktu puncak rata-rata terbesar adalah pada menara ke-28 berbeban $R=50$ ohm yakni 0.2548 ms dan berbeban $R=101.35$ ohm yakni 0.2535 ms sehingga semakin jauh posisi menara semakin lama waktu yang dibutuhkan tegangan lebih untuk sampai ke menara.

4.4 Permodelan dan Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi 150 kV Pada Pemasangan Arrester

Pemodelan selanjutnya adalah tujuan mengurangi tegangan lebih dengan memasang arrester karena dari hasil simulasi sebelumnya tanpa adanya arrester tegangan puncaknya meningkat dua kali tegangan yang dikenakan di ujung pengirim sehingga pemasangan arrester dilakukan pada ujung saluran saat keadaan saluran transmisi berbeban dan tanpa beban.

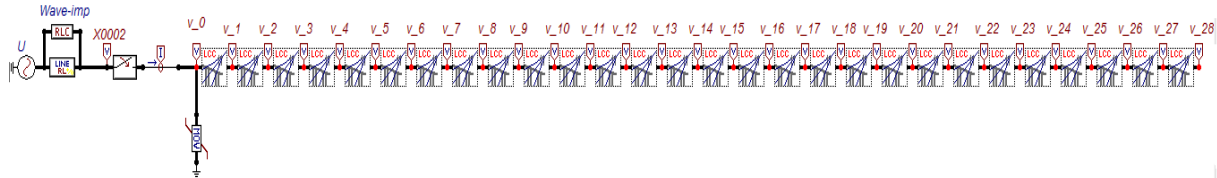
4.4.1 Permodelan dan Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi tanpa Beban dengan Pemasangan Arrester

Pada pemodelan saluran transmisi tanpa beban dimodelkan dengan menggunakan arrester seperti ditunjukkan pada gambar 4.27 di bawah ini.

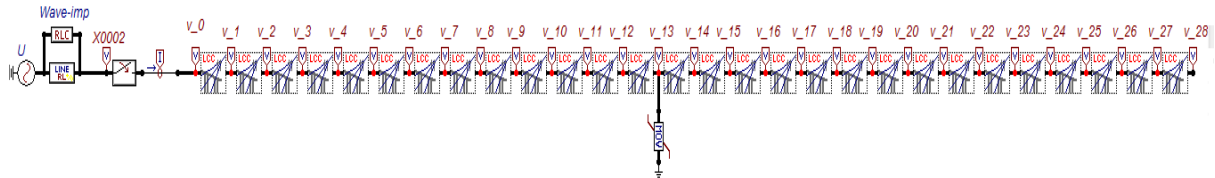


Gambar 4.27 Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan pemasangan Arrester

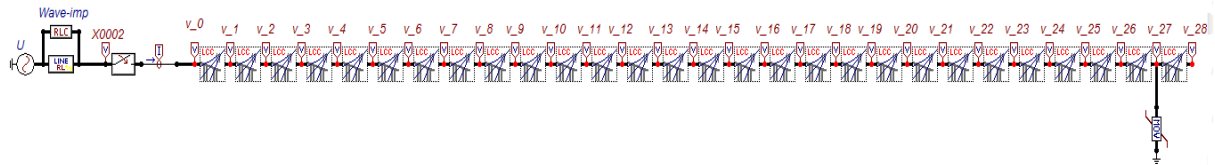
Mengacu pada Gambar 4.27, pemodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator tiga fasa (a) yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (b) dan terhubung pada 28 menara transmisi (c), dan sebuah arrester (d) yang dipasang di ujung saluran transmisi atau menara dekat peralatan. Pemasangan arrester dilakukan pada menara ke-1, ke-14 dan ke-28, dengan tujuan agar dapat mengurangi tegangan lebih yang berbahaya. Berikut ini pemodelan dibuat dengan metode pemasangan arrester yang dipasang pada ujung saluran transmisi :



Gambar 4.28 Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-1

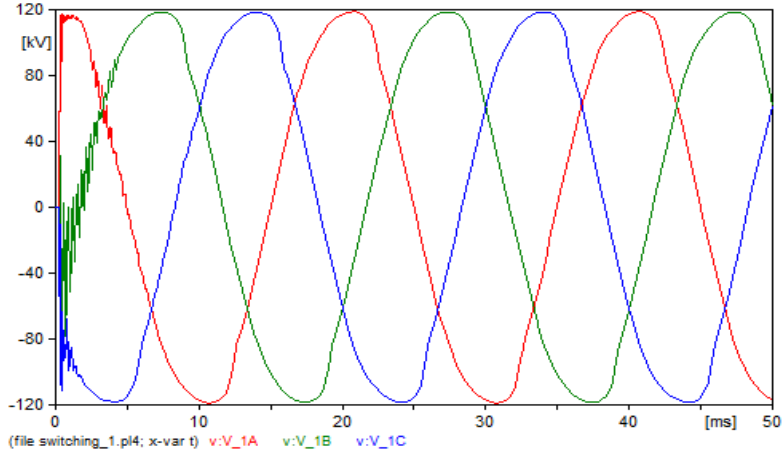


Gambar 4.29 Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-14

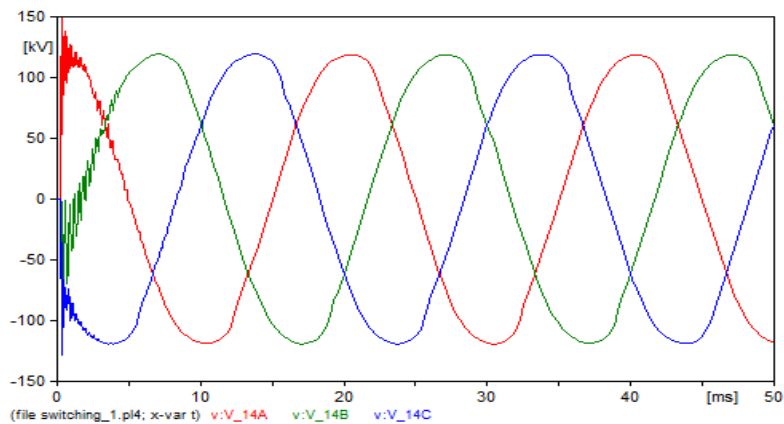


Gambar 4.30 Pemodelan saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-28

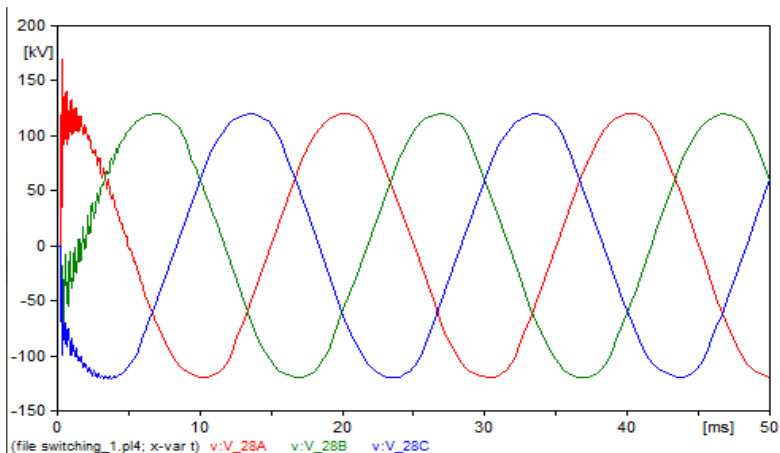
Pemodelan Gambar 4.28, yakni pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester dipasang pada menara ke-1 didapatkan hasil respon tegangan puncak sebagai berikut :



Gambar 4.31 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester Pada menara ke-1

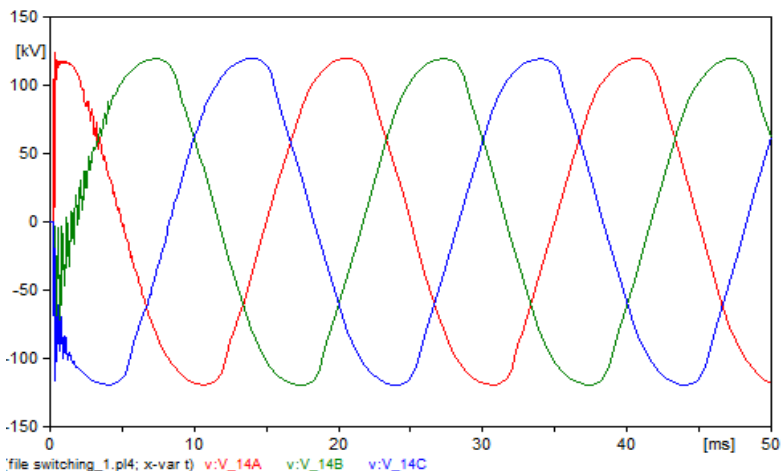


Gambar 4.32 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi tanpa beban

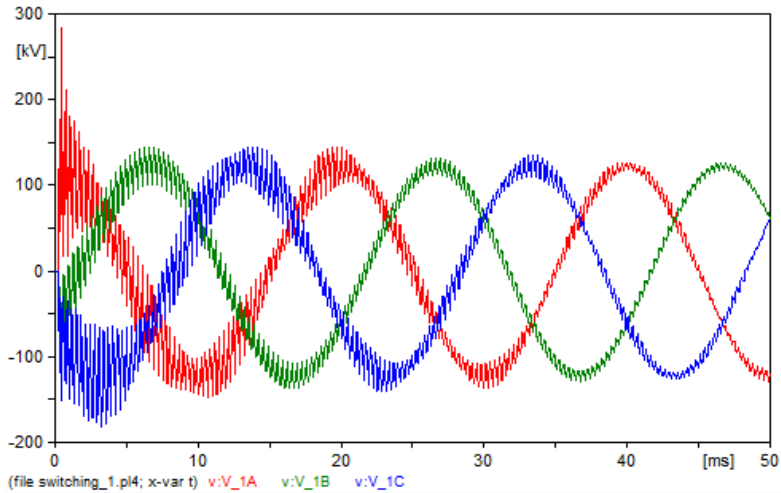


Gambar 4.33 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi tanpa beban

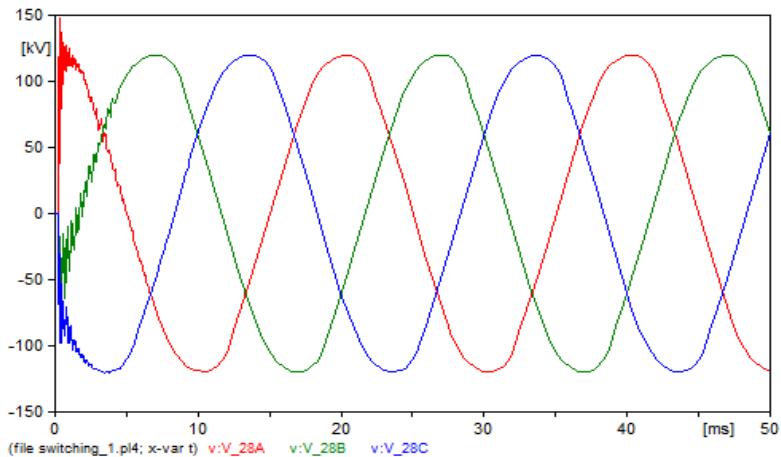
Mengacu pada pemodelan Gambar 4.29, hasil respon yang ditampilkan pada pemodelan saluran transmisi dengan pemasangan arrester pada menara ke-14, adalah sebagai berikut :



Gambar 4.34 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-14

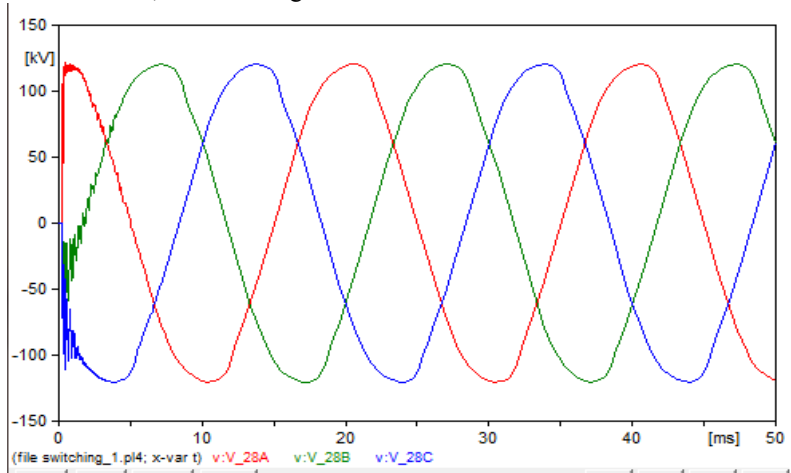


Gambar 4.35 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi tanpa beban

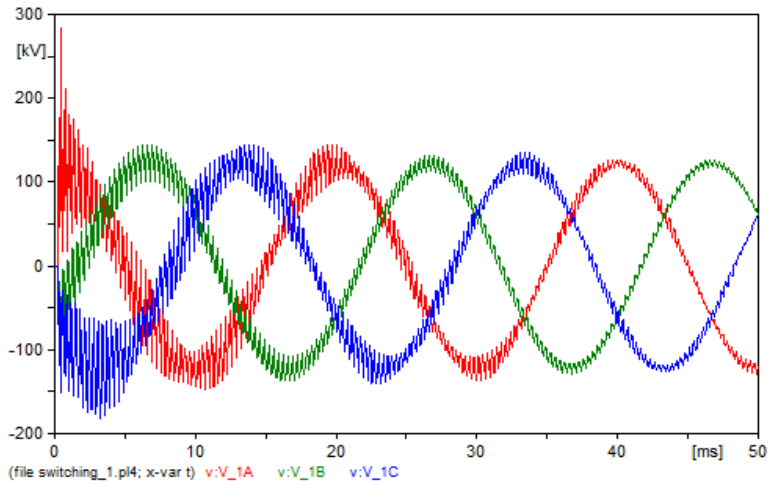


Gambar 4.36 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi tanpa beban

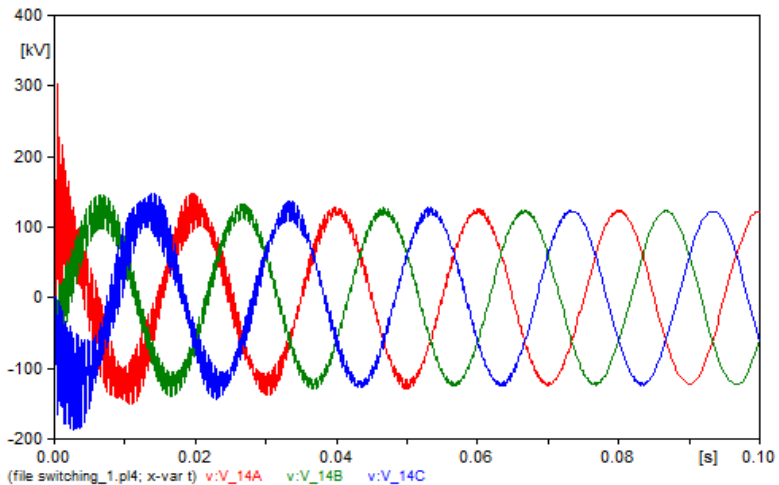
Mengacu pada pemodelan Gambar 4.30, hasil respon yang ditampilkan pada pemodelan saluran transmisi dengan pemasangan arrester pada menara ke-28, adalah sebagai berikut :



Gambar 4.37 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi tanpa beban dengan arrester pada menara ke-28



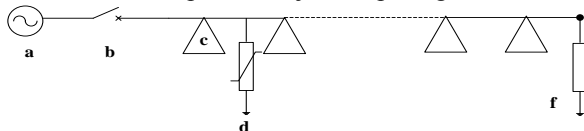
Gambar 4.38 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi tanpa beban



Gambar 4.39 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi tanpa beban

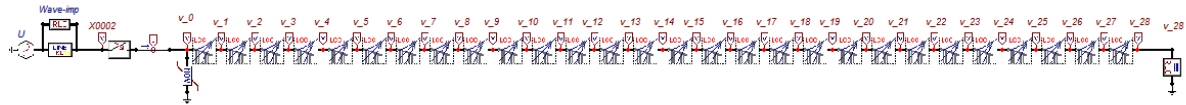
4.4.2 Permodelan dan Hasil Simulasi ATP/EMTP Saluran Transmisi Berbeban dengan Pemasangan Arrester

Pada pemodelan saluran transmisi berbeban dimodelkan dengan menggunakan arrester seperti ditunjukkan pada gambar 4.40.

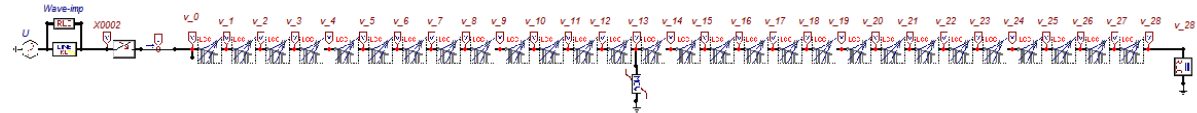


Gambar 4.40 Saluran transmisi dengan berbeban

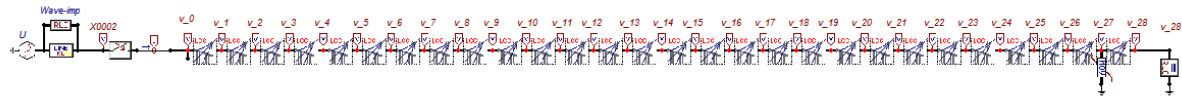
Mengacu pada Gambar 4.40, pemodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator tiga fasa (a) yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (b) dan terhubung pada 28 menara transmisi (c), sebuah arrester (d), dan di akhir saluran terdapat beban resistif (f). Pemasangan arrester dilakukan pada menara awal, tengah dan akhir saluran dengan tujuan agar dapat mengurangi tegangan lebih yang berbahaya. Berikut ini pemodelan dibuat dengan metode pemasangan arrester yang dipasang pada ujung saluran transmisi :



Gambar 4.41 Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-1



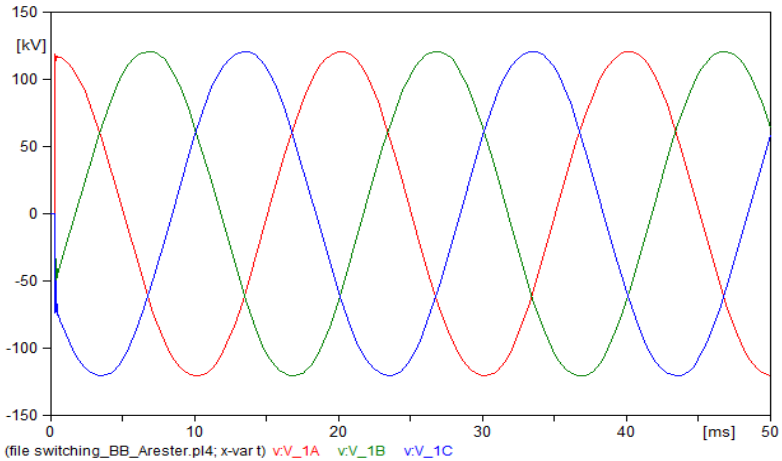
Gambar 4.42 Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-14



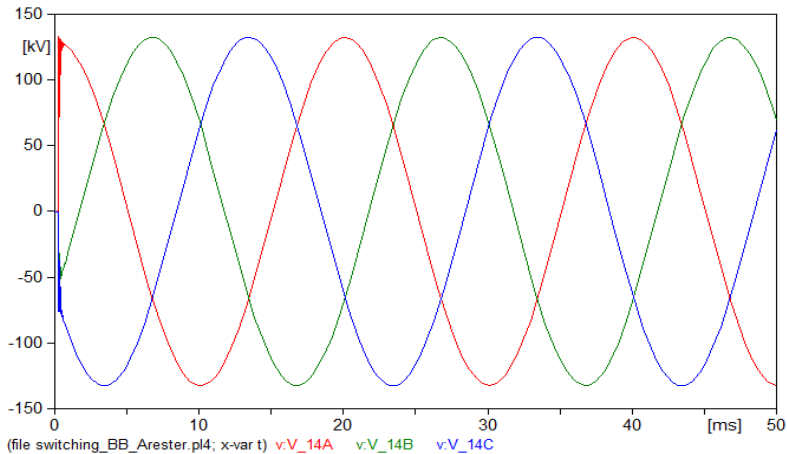
Gambar 4.43 Pemodelan saluran transmisi berbeban dengan arrester pada menara ke-28

Mengacu pada pemodelan gambar 4.41 ,hasil respon yang ditampilkan pada pemodelan saluran transmisi berbeban dengan pemasangan arrester pada menara ke-1, adalah sebagai berikut:

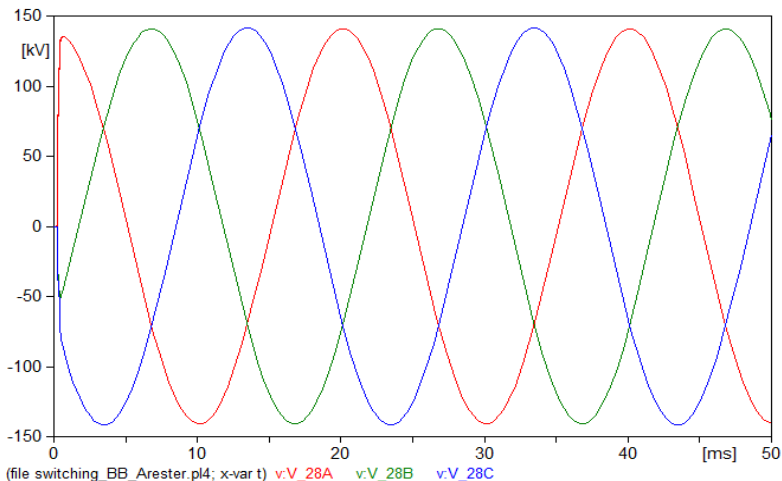
▪ **Beban Resistif dengan $R = 50 \text{ ohm}$**



Gambar 4.44 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-1

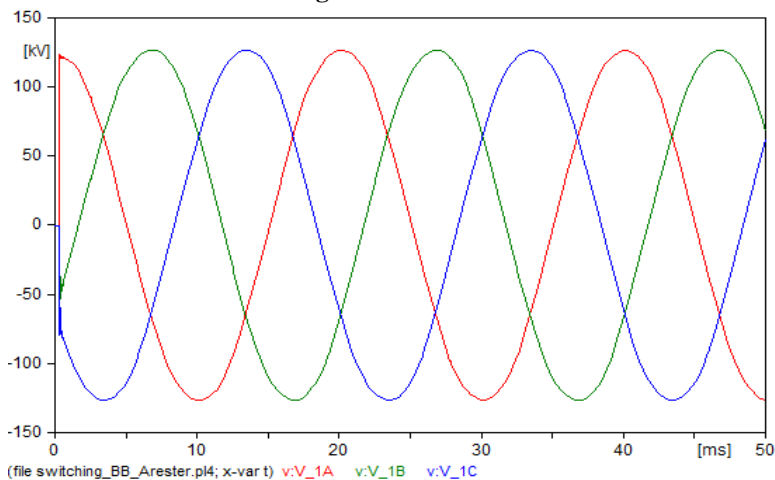


Gambar 4.45 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$)

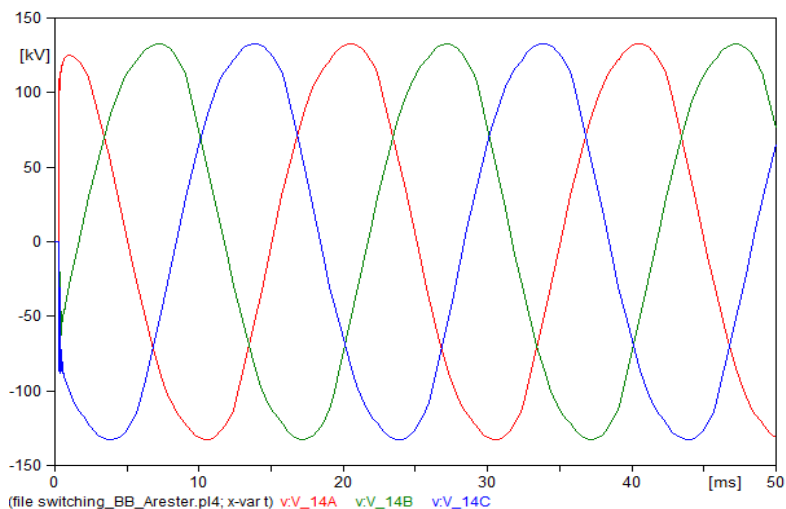


Gambar 4.46 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50$ ohm)

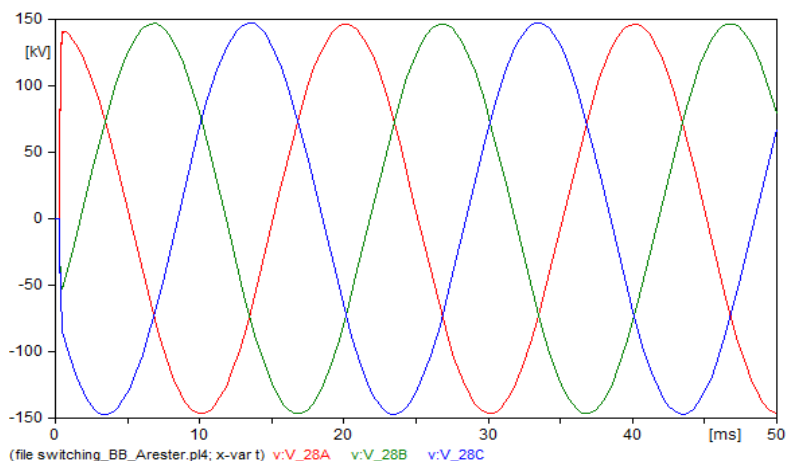
▪ **Beban Resistif dengan $R = 101.35$ ohm**



Gambar 4.47 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35$ ohm) dengan arrester menara ke-1



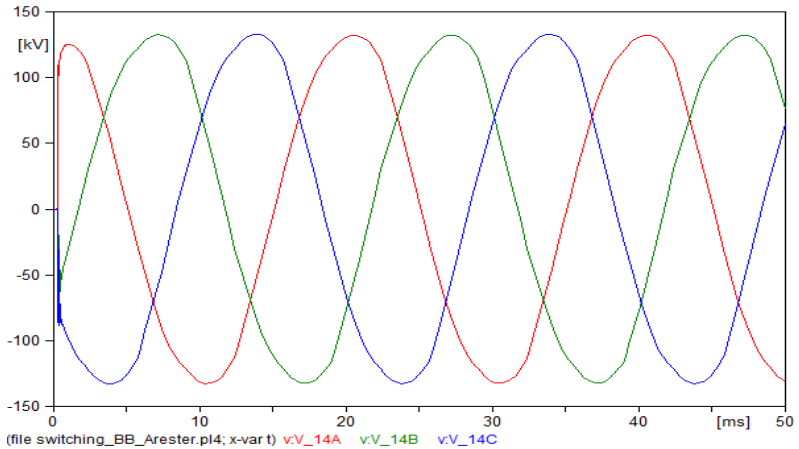
Gambar 4.48 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)



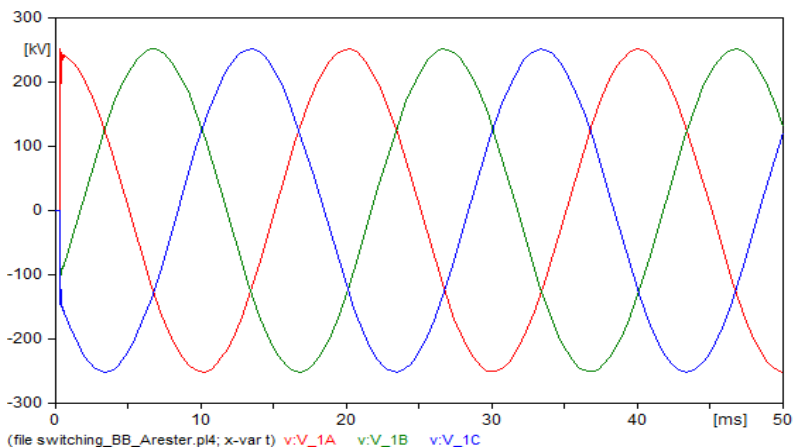
Gambar 4.49 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-1 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)

Mengacu pada pemodelan gambar 4.42 ,hasil respon yang ditampilkan pada pemodelan saluran transmisi berbeban dengan pemasangan arrester pada menara ke-14, adalah sebagai berikut:

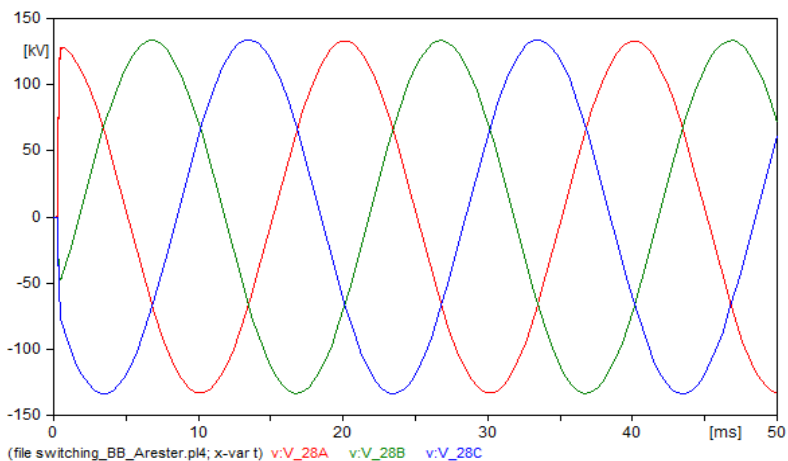
▪ **Beban Resistif dengan $R = 50 \text{ ohm}$**



Gambar 4.50 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-14

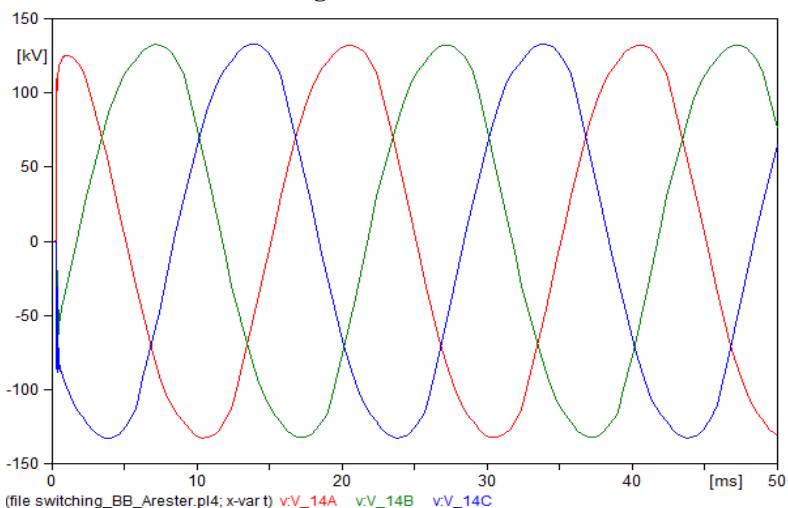


Gambar 4.51 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$)

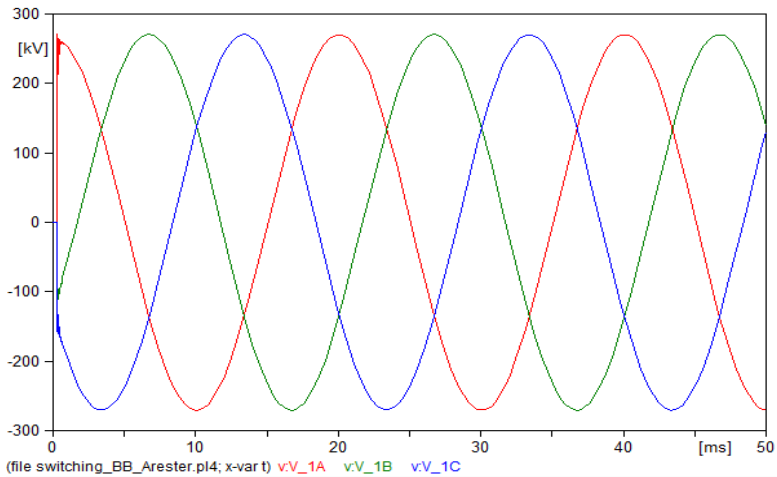


Gambar 4.52 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50$ ohm)

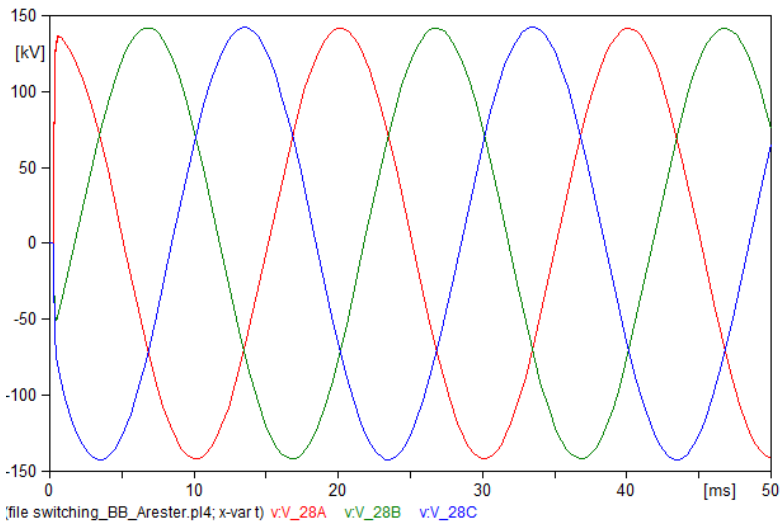
▪ **Beban Resistif dengan $R = 101.35$ ohm**



Gambar 4.53 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35$ ohm) dengan arrester menara ke-14



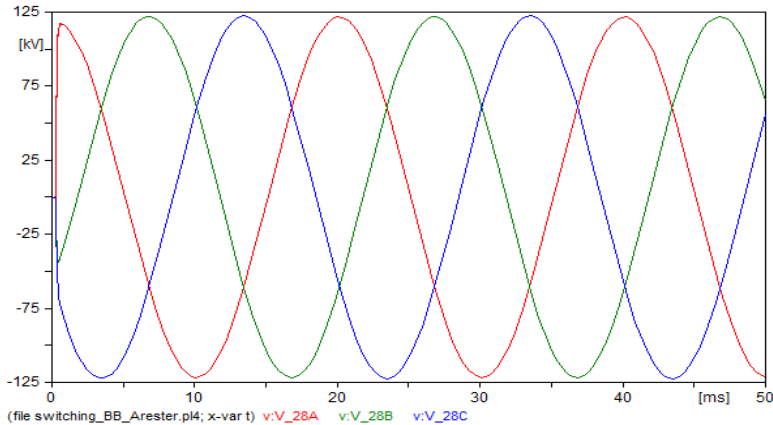
Gambar 4.54 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)



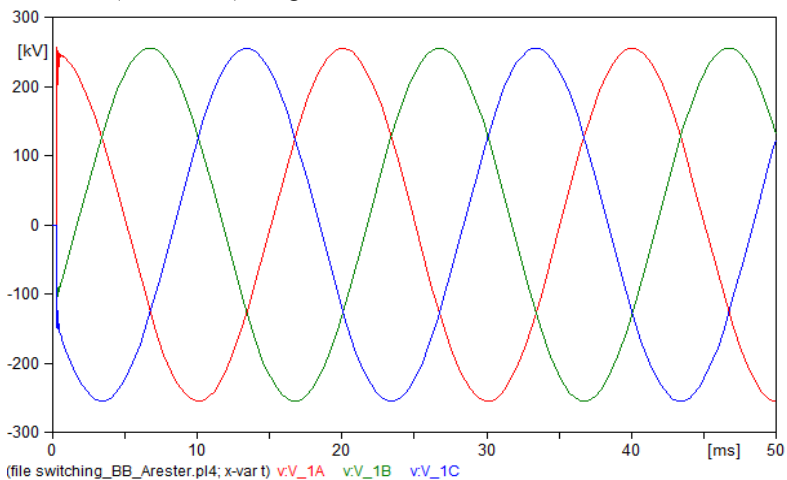
Gambar 4.55 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-28 saat arrester dipasang pada menara ke-14 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)

Mengacu pada pemodelan gambar 4.43 ,hasil respon yang ditampilkan pada pemodelan saluran transmisi berbeban dengan pemasangan arrester pada menara ke-28, adalah sebagai berikut:

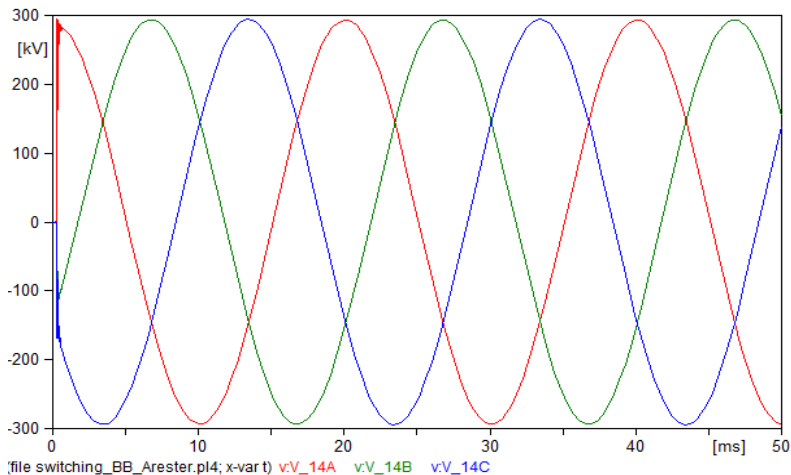
▪ **Beban Resistif dengan $R = 50 \text{ ohm}$**



Gambar 4.56 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$) dengan arrester menara ke-28

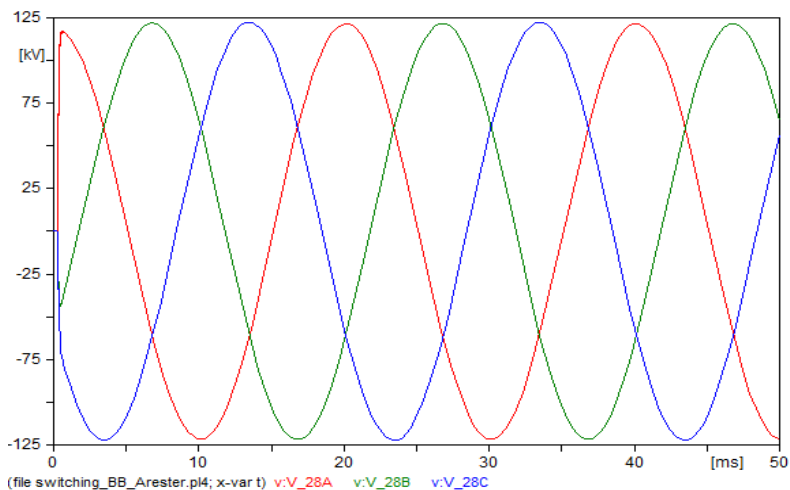


Gambar 4.57 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50 \text{ ohm}$)

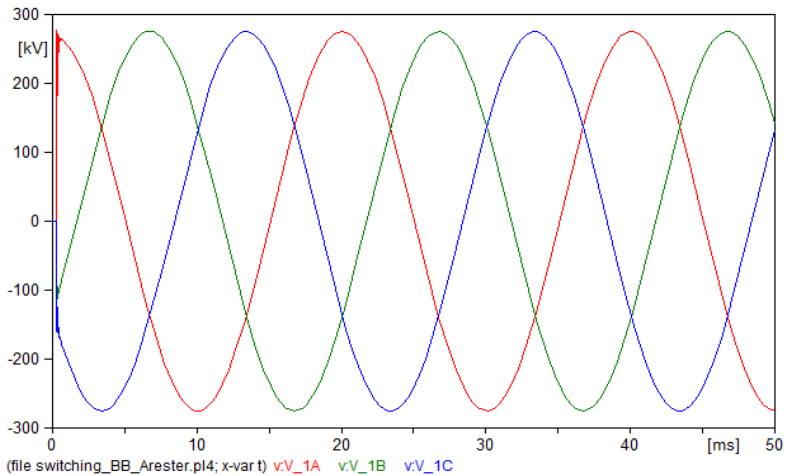


Gambar 4.58 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=50$ ohm)

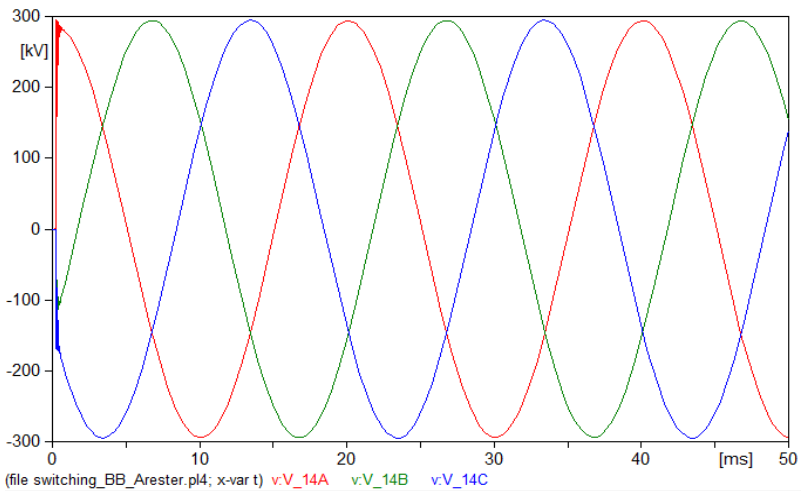
▪ **Beban Resistif dengan $R = 101.35$ ohm**



Gambar 4.59 Hasil simulasi tegangan puncak saluran transmisi berbeban ($R=101.35$ ohm) dengan arrester menara ke-28



Gambar 4.60 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-1 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)



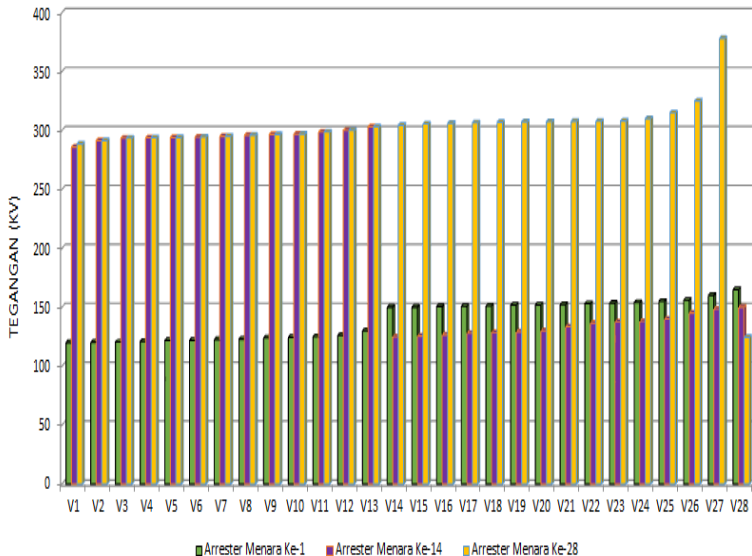
Gambar 4.61 Hasil simulasi tegangan puncak di menara ke-14 saat arrester dipasang pada menara ke-28 kondisi saluran transmisi berbeban ($R=101.35 \text{ ohm}$)

4.5 Analisis Saluran Transmisi Tanpa Beban dan Berbeban Pada Pemasangan Arrester

Analisa hasil simulasi pada kondisi saluran transmisi 150 kV pada tegangan puncak tiap menara yang berbeda-beda dapat dilihat pada grafik tegangan puncak tiap menara untuk kondisi saluran transmisi tanpa beban dan berbeban dengan resistansi sebesar 50 ohm dan resistansi 101.35 ohm. Dari hasil simulasi dapat dibuat hubungan antara tegangan terhadap lokasi pemasangan arrester yang berbeda-beda adalah sebagai berikut:

4.5.1 Analisis Saluran Transmisi Tanpa Beban Pada Pemasangan Arrester

Pada gambar 4.28 sampai dengan 4.30 menunjukkan simulasi rangkaian dengan menggunakan LCC 3 fasa dengan 28 menara transmisi. Permodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator 3 fasa yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (CB) dan terhubung pada 28 menara transmisi, dimana pada menara ke-1, menara ke-14 dan menara ke-28 dipasang arrester.

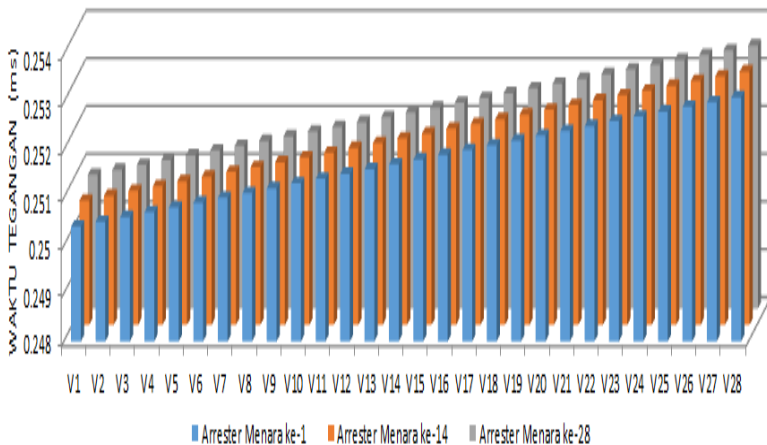


Gambar 4.62 Diagram tegangan saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester

Pada gambar 4.62 dapat dijelaskan bahwa pengaruh pemasangan arrester saat tidak berbeban yang dipasang di menara ke-1 mengakibatkan terjadinya pemotongan tegangan lebih sebesar 120 kV (v_1) dari tegangan saat tidak adanya arrester 285 kV (v_1), pemasangan arrester pada menara ke-14 sebesar 125 kV (v_{14}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 304 kV (v_{14}), dan pemasangan arrester pada menara ke-28 sebesar 124.47 kV (v_{28}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 382 kV (v_{28}), ketika tidak dipasangnya arrester menyebabkan tegangan lebih yang masuk ke peralatan menjadi lebih tinggi dan berbahaya untuk peralatan. Hal ini dikarenakan tidak adanya peralatan yang memotong tegangan lebih dan meneruskannya ke tanah.

Pengaruh pemasangan arrester yang dipasang di menara ke-1, menara ke-14 dan menara ke-28 mengakibatkan arrester sudah meredam tegangan transiennya akibatnya surja arrester bekerja pada tegangan tertentu di atas dari tegangan operasi, yang berfungsi untuk membuang muatan listrik dari surja hubung ke tanah dan tegangan setelah dipasang arrester terjadinya penurunan tegangan karena adanya sisa dari tegangan yang dipasang arrester. Oleh sebab itu, metode pemasangan satu arrester digunakan untuk mengurangi tegangan lebih supaya tegangan yang masuk ke peralatan tidak berbahaya. Tegangan yang akan masuk ke peralatan sudah dipotong terlebih dahulu oleh arrester sehingga tegangan tidak membahayakan peralatan. Saat terjadi surja hubung, varistor ZnO (arrester MOV) akan memotong surja tersebut tanpa menghasilkan tegangan susulan, sehingga ketika terjadi surja susulan varistor ZnO akan bekerja tanpa dipengaruhi oleh adanya tegangan susulan. Tegangan lebih transien berlangsung sangat cepat yang makin lama makin mengecil dan mencapai keadaan tunak (*steady state*) dalam waktu kurang lebih 5 milidetik (ms)

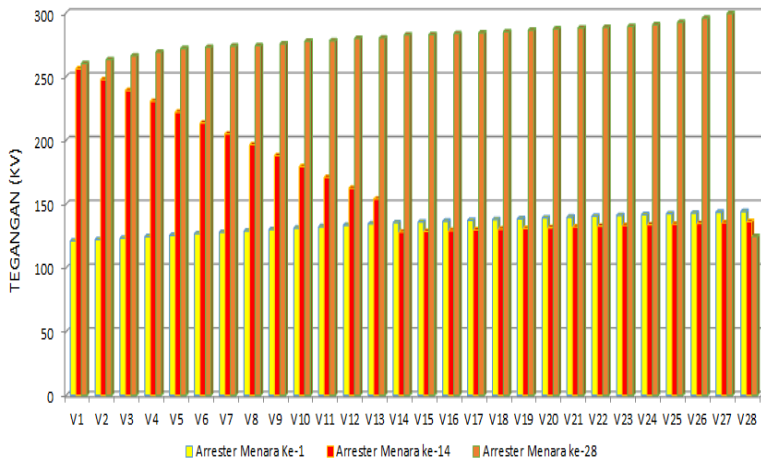
Berdasarkan hubungan diagram batang waktu puncak terhadap kondisi pemasangan arrester pada gambar 4.63, terlihat bahwa arrester membutuhkan waktu dalam melakukan kinerjanya, semakin dekat jarak arrester dengan peralatan, maka waktu yang diperlukan untuk arrester melakukan kinerja semakin besar sehingga semakin jauh posisi menara semakin lama waktu yang dibutuhkan tegangan lebih untuk sampai ke menara.



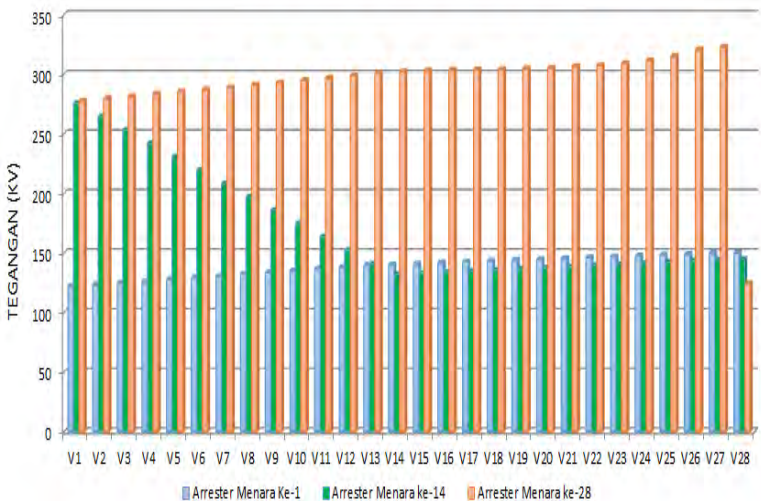
Gambar 4.63 Diagram waktu tegangan saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester

4.5.2 Analisis Saluran Transmisi Berbeban Pada Pemasangan Arrester

Pada gambar 4.41 sampai dengan 4.43 menunjukkan simulasi rangkaian dengan menggunakan LCC 3 fasa dengan 28 menara transmisi. Permodelan dilakukan dengan menggunakan sumber generator 3 fasa yang dihubungkan dengan *circuit breaker* (CB) dan terhubung pada 28 menara transmisi dan di akhir saluran terdapat beban resistif sebesar 50 ohm dan 101.35 ohm, dimana pada menara ke-1, menara ke-14 dan menara ke-28 dipasang arrester.



Gambar 4.64 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban terhadap pemasangan arrester saat $R = 50$ ohm

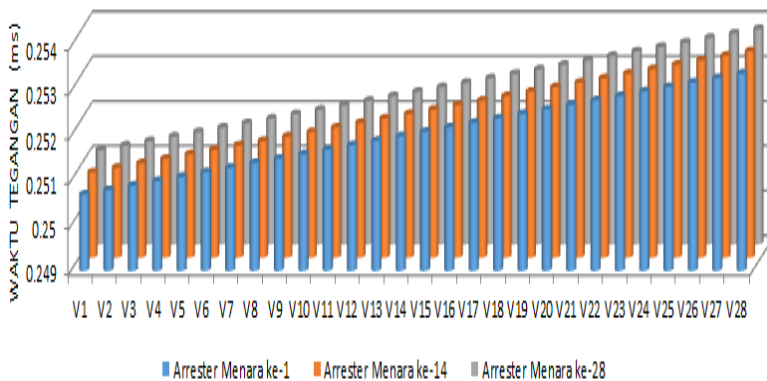


Gambar 4.65 Diagram tegangan saluran transmisi berbeban terhadap pemasangan arrester saat $R = 101.35$ ohm

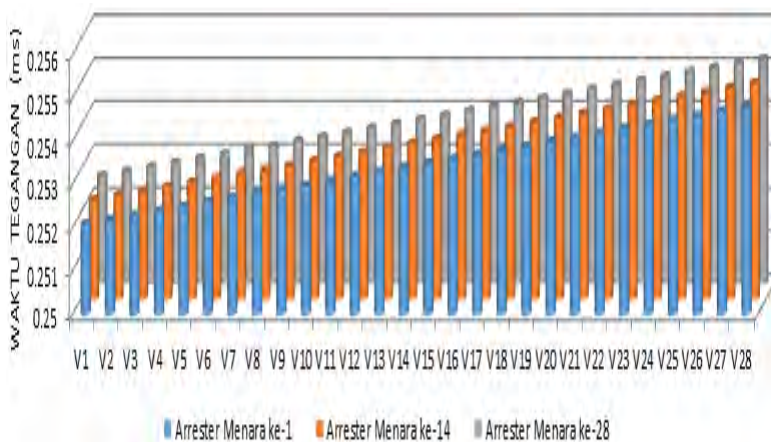
Pada gambar 4.64 dan 4.65 dapat dijelaskan bahwa pengaruh pemasangan arrester saat berbeban yang dipasang di menara ke-1 mengakibatkan terjadinya pemotongan tegangan lebih sebesar 121.05kV (v_1) dari tegangan saat tidak adanya arrester 245.82 kV (v_1), pemasangan arrester pada menara ke-14 sebesar 128.12 kV (v_{14}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 285.16 kV (v_{14}), dan pemasangan arrester pada menara ke-28 sebesar 124.61 kV (v_{28}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 300.01 kV (v_{28}), ketika tidak dipasangnya arrester dapat menimbulkan tegangan lebih yang terjadi pada proses *switching* sehingga menyebabkan adanya gelombang datang dan terjadinya osilasi. Osilasi ini dipengaruhi oleh induktansi dan kapasitansi. Hal ini seberapa besar dipengaruhi oleh distribusi tegangan awal sebab adanya kapasitansi rangkaian yang tidak kontinu, dalam waktu singkat arus mengalir dalam elemen induktif dan kapasitif. Distribusi tegangan awal mulai berubah dan akhirnya sebagian besar dipengaruhi oleh rangkaian induktif sehingga nilai tegangan puncaknya lebih tinggi dari tegangan operasi. Hasil tegangan setelah dipasang arrester terjadi penurunan tegangan disebabkan adanya sisa dari tegangan yang dipasang arrester

Pengaruh pemasangan arrester kondisi berbeban pada resistansi 50 ohm dan 101.35 ohm saat terjadi surja hubung, surja arrester dapat membelokkan gelombang berjalan dengan menggunakan komponen atau perangkat *Metal Oxide Varistor* (MOV). Komponen MOV bekerja dengan prinsip kerja mirip dengan *Kapasitor Nonpolar* tetapi tanpa penyimpanan muatan listrik di MOV tersebut. Jadi jika ada tegangan masuk yang melebihi batas MOV maka tegangan listrik ini akan di buang ke *grounding* melalui salah satu kutub MOV sehingga dapat memberikan pengamanan terhadap peralatan akibat tegangan kejut.

Berdasarkan hubungan diagram batang waktu puncak terhadap kondisi pemasangan arrester pada gambar 4.66 dan gambar 4.67, terlihat bahwa arrester membutuhkan waktu dalam melakukan kinerjanya, semakin dekat jarak arrester dengan peralatan, maka waktu yang diperlukan untuk arrester melakukan kinerja semakin besar sehingga semakin jauh posisi menara semakin lama waktu yang dibutuhkan tegangan lebih untuk sampai ke menara.



Gambar 4.66 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban saat $R = 50$ ohm terhadap pemasangan arrester



Gambar 4.67 Diagram waktu tegangan saluran transmisi berbeban saat $R = 101.35$ ohm terhadap pemasangan arrester

--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan, analisa serta pembahasan simulasi tegangan puncak dengan ATP/EMTP untuk GI Waru 150kV dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

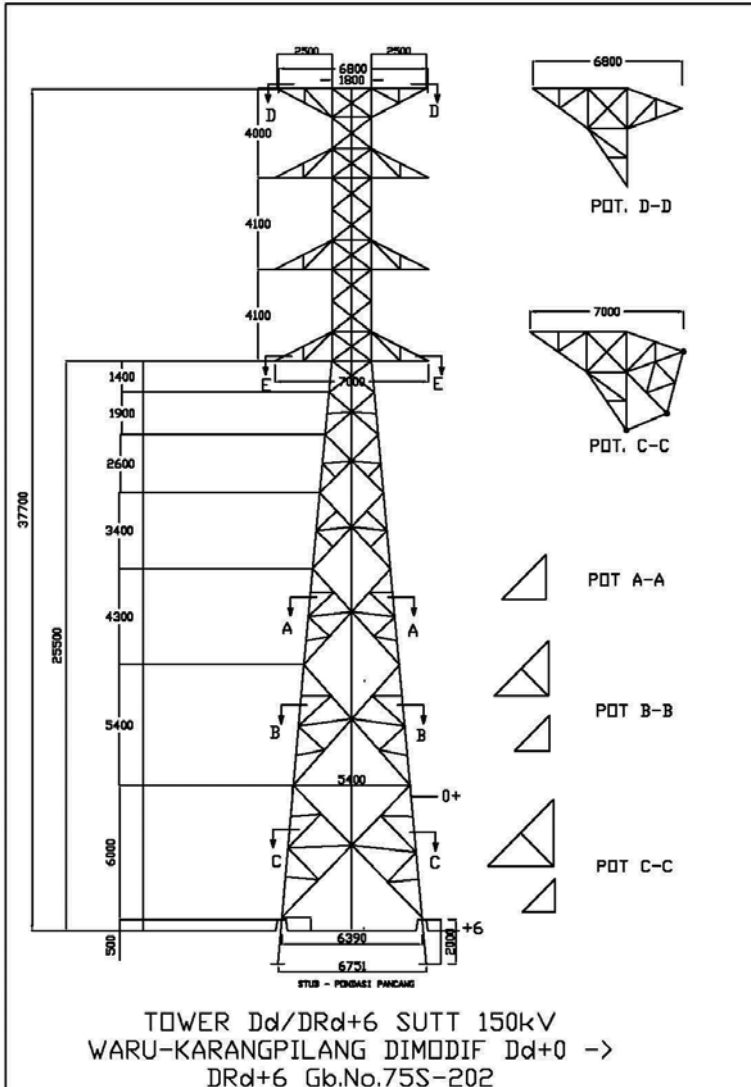
1. Respon tegangan puncak untuk tiap kawat fasa bila terjadi *switching* pada ujung saluran transmisi tanpa beban dengan tidak adanya arrester, menunjukkan respon tegangan puncak rata-ratanya sebesar 307.589 kV dengan waktu puncak rata-rata sebesar 0.2515 ms.
2. Respon tegangan puncak pada saluran transmisi dengan beban resistif 50 ohm, respon tegangan puncak rata-ratanya sebesar 278.635 kV, dengan waktu puncak rata-rata sebesar 0.2521 ms sedangkan dengan beban resistif 101.35 ohm respon tegangan puncak rata-rata sebesar 297.091 kV dengan waktu puncak rata-rata sebesar 0.2528 ms, sehingga tegangan lebih berbeban saat $R = 101.35$ ohm lebih meningkat dibandingkan dengan $R = 50$ ohm karena semakin besar resistansinya maka tegangan akan meningkat.
3. Tegangan lebih transien yang terjadi di ujung saluran transmisi 150 kV yang terbuka pada saat proses *switching* atau *energized* mencapai dua kali tegangan yang dikenakan di ujung pengirim sehingga sangat berbahaya bagi koordinasi sistem osilasinya sehingga untuk meredam tegangan lebih transien dan waktu transien pada menara ke-1 sampai menara ke-28 diperlukan surja arrester yaitu arrester MOV.
4. Pengaruh pemasangan arrester saat tidak berbeban yang dipasang di menara ke-1 mengakibatkan terjadinya pemotongan tegangan lebih sebesar 120 kV (v_1) dari tegangan saat tidak adanya arrester 285kV (v_1), pemasangan arrester pada menara ke-14 sebesar 125 kV (v_{14}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 304 kV (v_{14}), dan pemasangan arrester pada menara ke-28 sebesar 124.47kV (v_{28}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 382 kV (v_{28}).
5. Tegangan lebih transien berlangsung sangat cepat yang makin lama makin mengecil dan mencapai keadaan tunak (*steady state*) dalam

- waktu kurang lebih 5 milidetik (ms) saat kondisi saluran tidak berbeban dengan pemasangan arrester.
6. Pengaruh pemasangan arrester saat berbeban yang dipasang di menara ke-1 mengakibatkan terjadinya pemotongan tegangan lebih sebesar 121.05kV (v_1) dari tegangan saat tidak adanya arrester 245.82 kV (v_1), pemasangan arrester pada menara ke-14 sebesar 128.12 kV (v_{14}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 285.16 kV (v_{14}), dan pemasangan arrester pada menara ke-28 sebesar 124.61 kV (v_{28}) dari tegangan saat tidak adanya arrester sebesar 300.01 kV (v_{28}).
 7. Semakin dekat posisi menara dengan beban $R=50$ Ohm atau $R=101.35$ Ohm maka tegangan lebih *switching* akan diperhalus karena pada beban tersebut dipasang *grounding* di peralatannya.
 8. Semakin jauh posisi menara semakin lama waktu yang dibutuhkan tegangan lebih untuk sampai ke menara.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk evaluasi pengaruh lokasi pemasangan surja arrester pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV terhadap tegangan lebih *switching* di Gardu Induk Waru adalah pemasangan arrester di dekat gardu induk sangat berguna untuk membatasi tegangan berlebih *switching* pada gardu induk dan penerapan metode pemasangan arrester diaplikasikan pada saluran tegangan ekstra tinggi agar dapat menjadi pembanding dengan hasil analisa yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.

Lampiran A **Menara transmisi 150 kV**



Tabel A.1 Hasil pengukuran tahanan pentanahan menara SUTT 150kV jurusan Waru-Karangpilang

No	Jenis Tower	Hasil ukur (ohm)	Alamat Tower
1	Tension	0,2	Ketegan (Belakang GI Waru)
3	Tension	0,2	Pagesangan
4	Suspension	0,2	Pagesangan
5	Tension	0,3	Pagesangan
6	Suspension	0,3	Kebraon Gang V
7	Tension	0,2	Kebraon Gang IV
8	Tension	0,3	Kebraon Praja II
9	Suspension	0,2	Makam Kebraon Baru
10	Suspension	0,2	Balas Klumpik
11	Suspension	0,2	Balas Klumpik
12	Tension	0,2	Balas Klumpik
13	Tension	0,2	Balas Klumpik
14	Suspension	0,2	Gempol
15	Tension	0,2	Pesapen
16	Suspension	0,2	Pesapen
17	Tension	0,2	Pesapen
18	Suspension	0,2	Bangkingan
19	Suspension	0,2	Bangkingan
20	Suspension	0,3	Bangkingan
21	Suspension	0,2	Lidah
22	Tension	0,2	Lidah
23	Tension	0,2	Lidah
24	Suspension	0,3	Lidah
25	Suspension	0,3	Tanjung
26	Suspension	0,3	Tanjung
27	Tension	0,4	Tanjung
28	Tension	0,2	Depan GI Karangpilang

Tabel A.2 Jumlah isolator yang diperlukan dan lebar sela tanduk guna pengaman terhadap surja hubung standart PLN

Tegangan Nominal		66	77	110	154	187	220	275
Tegangan Ketahanan thd Surja Hubung		233	271	389	543	562	660	824
Z/Zo = 80%	Jumlah isolator yang diperlukan	4 (5)	5 (6)	7 (8)	10	10 (11)	12 (13)	16 (17)
	Lebar sela tanduk ($Z = 0,8 Z_o$)m	0,47 (0,59)	0,59 (0,71)	0,82 (0,94)	1,17	1,17 (1,29)	1,40 (1,52)	1,87 (1,98)
Z/Zo = 75%	Jumlah isolator yang diperlukan	0	5 (6)	7 (8)	10	11	13	17
	Lebar sela tanduk ($Z = 0,75 Z_o$)m	0,55	0,55 (0,66)	0,77 (0,88)	1,09	1,21	1,43	1,86

Tabel A.3 Jumlah isolator saluran yang diperlukan guna pengamanan terhadap surja hubung (menurut Abdul Kadir, UI-press, 1998)

Tegangan Nominal (kV)	11	22	33	66	77	110	154	187	220	275
Tegangan Maks yang diperbolehkan Vm (kV)	12	24	36	72	84	120	168	204	240	300
Tegangan Fasa Maks yang diperbolehkan Vm (kV)	9,8	19,6	29,4	58,8	68,6	98	137	167	196	245
Faktor Tegangan Lebih n	4,0	4,0	4,0	33,3	33,3	33,3	33,3	2,8	2,8	2,8
Tegangan Surja Hubung Vm x n (kV)	39,2	78,4	117,6	194	226	324	452	468	549	686
Daya Isolasi yang diperbolehkan (kV)	47,0	94,0	141,0	233	371	389	543	562	660	686
Jumlah Isolator yang diperlukan (A)	1	1 (2)	2	3 (4)	4	6	8 (9)	9 (10)	11 (12)	14 (15)
Selisih Isolasi dari (A)	1,66	0,83 (1,51)	1,01	0,95	1,05	1,06	0,97 (1,07)	1,12	1,11	1,06
Jumlah Isolator yang diperlukan untuk pemeliharaan (A)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Jumlah Isolator yang digunakan B = (A) + 1	2	2 (3)	2	4 (5)	5	7	9 (10)	10 (11)	12 (13)	15 (16)
Selisih dari (B)	3,20	1,51 (2,35)	1,57	1,51	1,29	1,18	1,07 (1,16)	1,12 (1,22)	1,11 (1,19)	1,06 (1,12)
Sistem Pentanahan	Tidak diketanahkan			tahanan atau reaktor				efektif		

Tabel A.4 Tingkat isolasi dasar (BIL) untuk berbagai tegangan

Tegangan maks untuk perencanaan peralatan	Tegangan Isolasi Penuh	Pengujian Isolasi dikurangi	Tegangan Isolasi Penuh	Pengujian Isolasi Dikurangi
100	450	380	185	150
123	550	450	230	185
145	650	555 450	275	230 185
170	750	660	325	275 230
245	1050	900 825 750	460	395 360 325
300		1175 1050 900		510 460 395
362		1300 1175 1050		570 510 460
420		1675 1550 1425 1300		740 680 630 570
525		1800 1675 1550 1425		790 740 680 630

Tabel A.5 Tingkat isolasi standar (SIL) untuk $52\text{kV} \leq U_m \leq 300\text{ kV}$

Highest Voltage For Equipment U_m (rms) kV	Base for p.u values $Um = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (peak) kV	Rated Lightning Impuls Withstand Voltage (rms) kV	Rated Power Frequency Short Duration Withstand Voltage (rms) kV
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450	185
145	118	550	230
170	139	650	275
245	200	750	325
		850	360
		950	395
		1.050	460

Lampiran B

Tabel B.1 Data permodelan LCC

LCC ke-	Phi	Rin	Rout	Ress (2/kmDC)	Horiz(m)	Vtower(m)	Vrad(m)	Sgap(cm)	Alpha	NB
1	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	23.74	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	16.54	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	12.54	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	27.33	0	0	0
2	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	29.44	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	25.34	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	21.24	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	34.29	0	0	0
3	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	24.91	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	20.81	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	16.71	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	30.67	0	0	0
4	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	25.43	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	21.33	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	17.23	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	31.08	0	0	0
5	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	25.95	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	21.85	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	17.75	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	31.34	0	0	0
6	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	26.47	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	22.37	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	18.27	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	34.58	0	0	0
7	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	26.99	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	22.89	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	18.76	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	31.76	0	0	0
8,9,10,11,12 13,14,15,16,17 18,19,20,21	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	27.51	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	23.41	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	19.28	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	32.28	0	0	0
22	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	28.03	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	23.92	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	19.8	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	32.8	0	0	0
23	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	28.55	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	24.45	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	20.32	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	33.32	0	0	0
24	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	29.07	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	24.97	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	20.84	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	33.84	0	0	0
25	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	29.59	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	25.49	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	21.36	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	34.36	0	0	0
26	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	30.11	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	26.01	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	21.88	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	34.88	0	0	0
27	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	30.63	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	26.53	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	22.4	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	35.4	0	0	0
28	1	0	1.25	0.0586	3.5	33.7	31.15	40	0	2
	2	0	1.25	0.0586	3.5	29.6	27.05	40	0	2
	3	0	1.25	0.0586	3.5	25.3	22.92	40	0	2
	0	0.16	0.43	0.0586	3.4	37.7	35.92	0	0	0

Tabel B.2 Respon tegangan saluran transmisi tanpa beban dan berbeban

Vtb	Nilai	Vb 50	Nilai	VB 101.35	Nilai
V1	285	V1	245.82	V1	270.25
V2	290.5	V2	248.78	V2	272.57
V3	293	V3	251.74	V3	274.89
V4	293.5	V4	254.7	V4	277.21
V5	294	V5	257.66	V5	279.53
V6	294.5	V6	260.62	V6	281.85
V7	295	V7	264.58	V7	284.17
V8	295.7	V8	268.54	V8	286.49
V9	296	V9	272.5	V9	288.81
V10	297	V10	276.46	V10	291.13
V11	298	V11	278.42	V11	293.45
V12	299	V12	281.38	V12	295.77
V13	302	V13	283.34	V13	298.09
V14	304	V14	285.16	V14	301.15
V15	305.5	V15	285.74	V15	302.17
V16	306	V16	286.32	V16	303.19
V17	306.5	V17	286.9	V17	304.21
V18	307	V18	287.48	V18	305.23
V19	307.3	V19	288.06	V19	306.25
V20	307.5	V20	288.64	V20	307.27
V21	307.7	V21	289.22	V21	308.29
V22	307.8	V22	290.11	V22	309.31
V23	308	V23	291.38	V23	310.33
V24	310	V24	292.65	V24	311.35
V25	325	V25	293.92	V25	312.37
V26	340	V26	295.19	V26	313.39
V27	355	V27	296.46	V27	314.41
V28	382	V28	300.01	V28	315.43
Rata2	307.589	Rata2	278.635	Rata2	297.091

Tabel B.3 Respon waktu saluran transmisi tanpa beban dan berbeban

Vtb	Nilai	Vb 50	Nilai	VB 101.35	Nilai
V1	0.2501	V1	0.2502	V1	0.2515
V2	0.2502	V2	0.2505	V2	0.2516
V3	0.2503	V3	0.2508	V3	0.2517
V4	0.2504	V4	0.251	V4	0.2518
V5	0.2505	V5	0.2512	V5	0.2519
V6	0.2506	V6	0.2513	V6	0.252
V7	0.2507	V7	0.2514	V7	0.2521
V8	0.2508	V8	0.2515	V8	0.2522
V9	0.2509	V9	0.2516	V9	0.2523
V10	0.251	V10	0.2517	V10	0.2524
V11	0.2511	V11	0.2518	V11	0.2525
V12	0.2512	V12	0.2519	V12	0.2526
V13	0.2513	V13	0.252	V13	0.2527
V14	0.2514	V14	0.2521	V14	0.2528
V15	0.2515	V15	0.2522	V15	0.2529
V16	0.2516	V16	0.2523	V16	0.253
V17	0.2517	V17	0.2524	V17	0.2531
V18	0.2518	V18	0.2525	V18	0.2532
V19	0.2519	V19	0.2526	V19	0.2533
V20	0.252	V20	0.2527	V20	0.2534
V21	0.2521	V21	0.2528	V21	0.2535
V22	0.2522	V22	0.2529	V22	0.2536
V23	0.2523	V23	0.253	V23	0.2537
V24	0.2524	V24	0.2531	V24	0.2538
V25	0.2525	V25	0.2532	V25	0.2539
V26	0.2526	V26	0.2533	V26	0.254
V27	0.2527	V27	0.2534	V27	0.2541
V28	0.2528	V28	0.2535	V28	0.2542
Rata2	0.2514	Rata2	0.2521	Rata2	0.2529

Tabel B.4 Respon tegangan saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester

Vtb A1	Nilai	Vtb A14	Nilai	Vtb A28	Nilai
V1	120	V1	285.9	V1	288.5
V2	120.2	V2	291.4	V2	291.4
V3	120.5	V3	293.5	V3	293.5
V4	121	V4	293.8	V4	293.8
V5	121.9	V5	294	V5	294
V6	122	V6	294.5	V6	294.5
V7	122.5	V7	295	V7	295
V8	123	V8	296	V8	296
V9	124	V9	296.5	V9	296.5
V10	124.45	V10	297	V10	297
V11	125.01	V11	298.65	V11	298.65
V12	126.13	V12	300	V12	300
V13	130	V13	303	V13	303
V14	150	V14	125	V14	304.5
V15	150.02	V15	125.5	V15	305.5
V16	150.5	V16	126.5	V16	306
V17	150.72	V17	127.9	V17	306.5
V18	151.05	V18	128.65	V18	307
V19	151.85	V19	129.01	V19	307.3
V20	152	V20	130	V20	307.5
V21	152.25	V21	133.45	V21	307.7
V22	153	V22	136.5	V22	307.8
V23	153.44	V23	137.7	V23	308
V24	154	V24	138	V24	310
V25	155	V25	140	V25	315
V26	156.03	V26	145	V26	325
V27	160	V27	148.5	V27	378
V28	165	V28	150	V28	124.47

Tabel B.5 Respon tegangan saluran transmisi berbeban resistif 50 ohm terhadap pemasangan arrester

Vb 50 A1	Nilai	Vb 50 A14	Nilai	Vb 50 A28	Nilai
V1	121.05	V1	256.05	V1	260.22
V2	122.17	V2	247.54	V2	263.16
V3	123.29	V3	239.03	V3	266.1
V4	124.41	V4	230.52	V4	269.04
V5	125.53	V5	222.01	V5	271.98
V6	126.65	V6	213.5	V6	272.92
V7	127.77	V7	204.99	V7	273.86
V8	128.89	V8	196.48	V8	274.16
V9	130.01	V9	187.97	V9	275.65
V10	131.13	V10	179.46	V10	277.82
V11	132.25	V11	170.95	V11	278.01
V12	133.37	V12	162.44	V12	279.86
V13	134.49	V13	153.93	V13	280.12
V14	135.29	V14	128.12	V14	282.65
V15	135.93	V15	128.68	V15	282.95
V16	136.57	V16	129.24	V16	283.61
V17	137.21	V17	129.8	V17	284.21
V18	137.85	V18	130.36	V18	285.02
V19	138.49	V19	130.92	V19	286.34
V20	139.13	V20	131.48	V20	287.32
V21	139.77	V21	132.04	V21	288.01
V22	140.41	V22	132.6	V22	288.51
V23	141.05	V23	133.16	V23	289.42
V24	141.69	V24	133.72	V24	290.54
V25	142.33	V25	134.28	V25	292.43
V26	142.97	V26	134.84	V26	295.67
V27	143.61	V27	135.4	V27	299.24
V28	144.12	V28	136.32	V28	124.52

Tabel B.6 Respon tegangan saluran transmisi berbeban resistif 101.35 ohm terhadap pemasangan arrester

VB 101.35 A1	Nilai	VB 101.35 A14	Nilai	VB 101.35 A28	Nilai
V1	122.01	V1	275.67	V1	277.54
V2	123.49	V2	264.46	V2	279.47
V3	124.97	V3	253.25	V3	281.4
V4	126.45	V4	242.04	V4	283.33
V5	127.93	V5	230.83	V5	285.26
V6	129.41	V6	219.62	V6	287.19
V7	130.89	V7	208.41	V7	289.12
V8	132.37	V8	197.2	V8	291.05
V9	133.85	V9	185.99	V9	292.98
V10	135.33	V10	174.78	V10	294.91
V11	136.81	V11	163.57	V11	296.84
V12	138.29	V12	152.36	V12	298.77
V13	139.77	V13	141.15	V13	300.7
V14	140.34	V14	132.14	V14	302.28
V15	141.07	V15	133.08	V15	302.88
V16	141.8	V16	134.02	V16	303.55
V17	142.53	V17	134.96	V17	303.96
V18	143.26	V18	135.9	V18	304.21
V19	143.99	V19	136.84	V19	304.89
V20	144.72	V20	137.78	V20	305.21
V21	145.45	V21	138.72	V21	306.78
V22	146.18	V22	139.66	V22	307.42
V23	146.91	V23	140.6	V23	309.14
V24	147.64	V24	141.54	V24	311.43
V25	148.37	V25	142.48	V25	315.03
V26	149.1	V26	143.42	V26	320.56
V27	149.83	V27	144.36	V27	322.81
V28	150	V28	145.01	V28	124.61

Tabel B.7 Respon waktu saluran transmisi tanpa beban terhadap pemasangan arrester

Vtb A1	Nilai	Vtb A14	Nilai	Vtb A28	Nilai
V1	0.2504	V1	0.2506	V1	0.2508
V2	0.2505	V2	0.2507	V2	0.2509
V3	0.2506	V3	0.2508	V3	0.251
V4	0.2507	V4	0.2509	V4	0.2511
V5	0.2508	V5	0.251	V5	0.2512
V6	0.2509	V6	0.2511	V6	0.2513
V7	0.251	V7	0.2512	V7	0.2514
V8	0.2511	V8	0.2513	V8	0.2515
V9	0.2512	V9	0.2514	V9	0.2516
V10	0.2513	V10	0.2515	V10	0.2517
V11	0.2514	V11	0.2516	V11	0.2518
V12	0.2515	V12	0.2517	V12	0.2519
V13	0.2516	V13	0.2518	V13	0.252
V14	0.2517	V14	0.2519	V14	0.2521
V15	0.2518	V15	0.252	V15	0.2522
V16	0.2519	V16	0.2521	V16	0.2523
V17	0.252	V17	0.2522	V17	0.2524
V18	0.2521	V18	0.2523	V18	0.2525
V19	0.2522	V19	0.2524	V19	0.2526
V20	0.2523	V20	0.2525	V20	0.2527
V21	0.2524	V21	0.2526	V21	0.2528
V22	0.2525	V22	0.2527	V22	0.2529
V23	0.2526	V23	0.2528	V23	0.253
V24	0.2527	V24	0.2529	V24	0.2531
V25	0.2528	V25	0.253	V25	0.2532
V26	0.2529	V26	0.2531	V26	0.2533
V27	0.253	V27	0.2532	V27	0.2534
V28	0.2531	V28	0.2533	V28	0.2535

Tabel B.8 Respon waktu saluran transmisi berbeban resistif 50 ohm terhadap pemasangan arrester

Vb 50 A1	Nilai	Vb 50 A14	Nilai	Vb 50 A28	Nilai
V1	0.2507	V1	0.2509	V1	0.2511
V2	0.2508	V2	0.251	V2	0.2512
V3	0.2509	V3	0.2511	V3	0.2513
V4	0.251	V4	0.2512	V4	0.2514
V5	0.2511	V5	0.2513	V5	0.2515
V6	0.2512	V6	0.2514	V6	0.2516
V7	0.2513	V7	0.2515	V7	0.2517
V8	0.2514	V8	0.2516	V8	0.2518
V9	0.2515	V9	0.2517	V9	0.2519
V10	0.2516	V10	0.2518	V10	0.252
V11	0.2517	V11	0.2519	V11	0.2521
V12	0.2518	V12	0.252	V12	0.2522
V13	0.2519	V13	0.2521	V13	0.2523
V14	0.252	V14	0.2522	V14	0.2524
V15	0.2521	V15	0.2523	V15	0.2525
V16	0.2522	V16	0.2524	V16	0.2526
V17	0.2523	V17	0.2525	V17	0.2527
V18	0.2524	V18	0.2526	V18	0.2528
V19	0.2525	V19	0.2527	V19	0.2529
V20	0.2526	V20	0.2528	V20	0.253
V21	0.2527	V21	0.2529	V21	0.2531
V22	0.2528	V22	0.253	V22	0.2532
V23	0.2529	V23	0.2531	V23	0.2533
V24	0.253	V24	0.2532	V24	0.2534
V25	0.2531	V25	0.2533	V25	0.2535
V26	0.2532	V26	0.2534	V26	0.2536
V27	0.2533	V27	0.2535	V27	0.2537
V28	0.2534	V28	0.2536	V28	0.2538

Tabel B.9 Respon waktu saluran transmisi berbeban resistif 101.35ohm terhadap pemasangan arrester

VB 101.35 A1	Nilai	VB 101.35 A14	Nilai	VB 101.35 A28	Nilai
V1	0.2521	V1	0.2523	V1	0.2525
V2	0.2522	V2	0.2524	V2	0.2526
V3	0.2523	V3	0.2525	V3	0.2527
V4	0.2524	V4	0.2526	V4	0.2528
V5	0.2525	V5	0.2527	V5	0.2529
V6	0.2526	V6	0.2528	V6	0.253
V7	0.2527	V7	0.2529	V7	0.2531
V8	0.2528	V8	0.253	V8	0.2532
V9	0.2529	V9	0.2531	V9	0.2533
V10	0.253	V10	0.2532	V10	0.2534
V11	0.2531	V11	0.2533	V11	0.2535
V12	0.2532	V12	0.2534	V12	0.2536
V13	0.2533	V13	0.2535	V13	0.2537
V14	0.2534	V14	0.2536	V14	0.2538
V15	0.2535	V15	0.2537	V15	0.2539
V16	0.2536	V16	0.2538	V16	0.254
V17	0.2537	V17	0.2539	V17	0.2541
V18	0.2538	V18	0.254	V18	0.2542
V19	0.2539	V19	0.2541	V19	0.2543
V20	0.254	V20	0.2542	V20	0.2544
V21	0.2541	V21	0.2543	V21	0.2545
V22	0.2542	V22	0.2544	V22	0.2546
V23	0.2543	V23	0.2545	V23	0.2547
V24	0.2544	V24	0.2546	V24	0.2548
V25	0.2545	V25	0.2547	V25	0.2549
V26	0.2546	V26	0.2548	V26	0.255
V27	0.2547	V27	0.2549	V27	0.2551
V28	0.2548	V28	0.255	V28	0.2552

Lampiran C

Tabel C.1 Standart ACSR

Table A.1 Electrical Characteristics of Bare Aluminum Conductors Steel-Reinforced (ACSR)[†]

Code word	Aluminum area, cmil	Stranding Al/St	Layers of aluminum	Outside diameter, in	Resistance			GMR D_s , ft	Reactance per conductor 1-ft spacing, 60 Hz	
					Dc, 20°C, $\Omega/1,000$ ft	Ac, 60 Hz			Inductive X_a , Ω/mi	Capacitive X_c , $\text{M}\Omega\text{-mi}$
						20°C, Ω/mi	50°C, Ω/mi			
Waxwing	266,800	18/1	2	0.009	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	266,800	26/7	2	0.042	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300,000	26/7	2	0.080	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Merlin	336,400	18/1	2	0.084	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336,400	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397,500	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397,500	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264	0.441	0.1004
Flicker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0289	0.432	0.0992
Hawk	477,000	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477,000	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0284	0.424	0.0960
Osprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0306	0.423	0.0981
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.422	0.0969
Dove	556,500	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0955
Rook	638,000	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950
Groebark	638,000	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795,000	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0925
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0897
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0388	0.395	0.0897
Cardinal	954,000	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0890
Ortolan	1,033,500	45/7	3	1.259	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1,113,000	54/19	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0444	0.378	0.0855
Pheasant	1,272,000	54/19	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0460	0.372	0.0847
Bobolink	1,431,000	45/7	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0470	0.365	0.0837
Plover	1,431,000	54/19	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0494	0.371	0.0829
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.583	0.0090	0.0476	0.0515	0.0523	0.358	0.0814
Bluebird	2,186,000	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

[†] Most used multilayer sizes.

¹ Data, by permission, from Aluminum Association, "Aluminum Electrical Conductor Handbook," New York, September 1971.

